

Avaliação de Conforto Térmico Exterior na Praça José Adriano (ESTIG) no Instituto Politécnico de Bragança

Karoline Elen de Souza Hilário

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança
para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da
dupla diplomação com o Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais*

Orientado por

Artur Jorge de Jesus Gonçalves

João Paulo Castro

Frederico Keizo Odan

Bragança

2025



Karoline Elen de Souza Hilário

**Avaliação de Conforto Térmico Exterior na Praça
José Adriano (ESTIG) no Instituto Politécnico de
Bragança**

Bragança

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força, resiliência e perseverança para chegar até aqui, e por não me permitir desistir nos momentos mais difíceis desta caminhada.

À minha mãe, Iris Camila, que mesmo à distância sempre me apoiou, acreditou em mim e esteve presente de forma incondicional, sendo fundamental ao longo de todo este percurso.

Ao meu orientador, Artur Gonçalves, pela paciência, pelo tempo e pela dedicação, bem como pelo constante auxílio em todas as etapas da elaboração deste trabalho e nas atividades de campo, contribuindo de forma essencial para o seu desenvolvimento.

À minha primeira família em Portugal, Letícia Murta, Maria Julia Filizzola e Brisa Lourenço, pelo acolhimento, carinho e suporte em inúmeros momentos, tornando esta experiência mais leve e significativa.

Ao Leonardo Jorge, pelo apoio constante e pela ajuda indispensável, sobretudo na etapa final deste trabalho, marcada por desafios e superações. A sua presença foi fundamental não apenas no suporte emocional, mas também na construção e desenvolvimento deste trabalho, contribuindo ativamente em diferentes etapas, incluindo as atividades de campo. Mais do que um apoio acadêmico, foi família nos momentos de maior desafio, oferecendo força, equilíbrio e incentivo.

Aos colegas que me auxiliaram nas atividades de campo, Éric de Souza, Lucas Mori e Jullyele Plana, pela colaboração e disponibilidade. Um agradecimento especial ao colega Lucas Borges, que além de contribuir nas atividades de campo, também foi fundamental no processo de desenvolvimento da minha pesquisa.

À professora Simone Hirashima, que veio do CEFET-MG e prestou valioso auxílio à minha pesquisa, compartilhando seus conhecimentos na área, colaborando no trabalho de campo e demonstrando sempre grande paciência e generosidade acadêmica.

À investigadora Nihan Parlak, que contribuiu significativamente para a minha pesquisa no âmbito do paisagismo e também auxiliou nas atividades de campo, enriquecendo este trabalho com a sua experiência e conhecimento.

Ao meu orientador no Brasil, Frederico Odan, por aceitar me acompanhar na elaboração deste trabalho e pelo apoio acadêmico ao longo do processo.

Por fim, agradeço a todos os amigos que conheci e cruzei ao longo desta jornada de intercâmbio, que de alguma forma me ofereceram apoio, incentivo e companheirismo. Aos amigos e familiares do Brasil, que mesmo à distância, estiveram sempre presentes, acreditando em mim e me fortalecendo nesta caminhada.

RESUMO

As transformações associadas ao crescimento populacional e à expansão urbana têm intensificado os impactos ambientais, refletindo-se em alterações do clima local. Nesse contexto, as cidades tendem a desenvolver microclimas próprios, resultantes da interação entre morfologia urbana, materiais de construção, cobertura vegetal e uso do solo. Diante deste cenário, ganha relevância a produção de estudos que auxiliem a gestão do ambiente urbano, apoiem medidas de adaptação climática e contribuam para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em particular o ODS 11, que visa tornar as cidades mais inclusivas e sustentáveis. Tendo em conta esses aspectos, este estudo tem como objetivo avaliar as condições microclimáticas em uma área dentro do campus do Instituto Politécnico de Bragança, com foco na Praça José Adriano (praça da ESTIG), e analisar o potencial de Soluções Baseadas na Natureza (SBNs) na melhoria do conforto térmico. Para tal, foram realizadas medições de variáveis climáticas em dois dias representativos das estações fria e quente (16/01/2025, inverno, e 26/06/2025, verão), utilizando estações e sensores microclimáticos. Esses dados serviram de base para a caracterização do microclima local, apoio à modelação no software ENVI-met e verificação do desempenho das simulações. Paralelamente, foram recolhidas informações sobre a cobertura vegetal, o tipo de solo e a configuração do espaço construído, permitindo a elaboração de um modelo 3D do local. Questionários de percepção térmica foram aplicados com o objetivo de relacionar as condições medidas com a sensação de conforto dos indivíduos. A partir desses elementos, foram desenvolvidos um cenário de referência e um cenário alternativo com introdução de SBNs, cujas simulações permitiram comparar parâmetros como temperatura do ar e temperatura média radiante entre as diferentes configurações. Os resultados obtidos indicam que a introdução de soluções baseadas na natureza (SBN) no cenário alternativo promoveu melhorias mensuráveis no microclima urbano. No período de verão, observou-se uma redução média de até 1 °C na temperatura do ar e de cerca de 10 °C na temperatura média radiante durante as horas de maior insolação, enquanto no inverno os efeitos foram mais discretos e espacialmente dispersos.

Palavras-chave: Conforto térmico; ENVI-met; Microclima Urbano; Soluções Baseadas na Natureza.

ABSTRACT

The transformations associated with population growth and urban expansion have intensified environmental impacts, which are reflected in changes to the local climate. In this context, cities tend to develop their own microclimates, resulting from the interaction between urban morphology, construction materials, vegetation cover, and land use. Given this scenario, the production of studies that support the management of the urban environment, promote climate adaptation measures, and contribute to the Sustainable Development Goals, particularly SDG 11, which aims to make cities more inclusive and sustainable, becomes increasingly relevant. Taking these aspects into account, this study aims to evaluate the microclimatic conditions in an area within the campus of the Polytechnic Institute of Bragança, focusing on Praça José Adriano (ESTIG Square), and to analyse the potential of Nature-Based Solutions (NBS) to improve thermal comfort. To this end, measurements of climatic variables were carried out on two days representative of the cold and hot seasons (16/01/2025, winter, and 26/06/2025, summer), using microclimatic stations and sensors. These data served as a basis for the characterisation of the local microclimate, for modelling in the ENVI-met software, and for verifying the performance of the simulations. In parallel, information was collected on vegetation cover, soil type, and the configuration of the built environment, allowing the development of a 3D model of the site. Thermal perception questionnaires were applied in order to relate the measured conditions to individuals' thermal comfort sensation. Based on these elements, a reference scenario and an alternative scenario with the introduction of NBS were developed, whose simulations made it possible to compare parameters such as air temperature and mean radiant temperature between the different configurations. The results obtained indicate that the introduction of nature-based solutions (NBS) in the alternative scenario promoted measurable improvements in the urban microclimate. During the summer period, an average reduction of up to 1 °C in air temperature and about 10 °C in mean radiant temperature was observed during peak solar hours, whereas in winter the effects were more moderate and spatially dispersed.

Keywords: Thermal comfort; ENVI-met; Urban Microclimate; Nature-Based Solutions.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	IV
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 CLIMA URBANO.....	18
2.1.1 Escalas do clima urbano.....	19
2.2 MICROCLIMA.....	21
2.2.1 Influência dos materiais no microclima urbano.....	22
2.2.2 Influência da vegetação no ambiente urbano.....	22
2.2.3 Influência dos edifícios no microclima urbano.....	24
2.2.4 Fator de Visão de Céu.....	25
2.3 VARIÁVEIS DO CLIMA URBANO.....	26
2.4 CONFORTO TÉRMICO.....	27
2.4.1 Fatores que influenciam o conforto térmico.....	29
2.4.2 Carta Bioclimática de Olgyay.....	31
2.5 SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA.....	32
2.6 MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....	33

2.6.1	ENVI-met.....	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	ÁREA DE ESTUDO	37
3.2	CLIMA DA REGIÃO.....	38
3.3	MEDIÇÕES DE DADOS E MONITORIZAÇÃO CLIMÁTICA	39
3.3.1	Período de medições	40
3.4	MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS ESPACIAIS	42
3.4.1	Dimensionamento dos edifícios	42
3.4.2	Levantamento dos dados das árvores.....	43
3.4.3	Classificação do tipo de solo e superfície	43
3.5	INQUÉRITOS.....	43
3.6	MODELAÇÕES E SIMULAÇÕES NO ENVI-MET.....	46
3.6.1	Harmonização Espacial e Comparação de Cenários de Verão no ENVI-met.....	47
3.7	CENÁRIOS DESENVOLVIDOS NO ENVI-MET.....	48
3.7.1	Cenário real.....	48
3.7.2	Cenário alternativo	49
3.8	MÉTODOS ESTATÍSTICOS	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1	ANÁLISE DAS MEDIÇÕES DE ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS	53
4.1.1	Temperatura do ar	53
4.1.2	Temperatura Média Radiante.....	56
4.1.3	Humidade relativa e Velocidade do ar	59
4.1.4	Correlação de dados para temperatura do ar e temperatura média radiante	63

4.1	ANÁLISE DOS QUESTIONÁRIOS.....	66
4.1.1	Análises estatísticas	66
4.2	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DESENVOLVIDAS NO ENVI-MET	72
4.3.1	Análises para o cenário real simulado	73
4.3.2	Análises para o cenário alternativo simulado	77
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE A MONITORIZAÇÃO E OS CENÁRIOS SIMULADOS	82
4.3.1	Comparações realizadas no período de inverno.....	83
4.4.2	Comparações realizadas no período de verão.....	89
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE O CENÁRIO REAL E ALTERNATIVO.....	95
4.4.1	Comparações para a Temperatura do ar no inverno	95
4.4.2	Comparações para Temperatura Média Radiante no inverno.....	97
4.4.3	Comparações para a Temperatura do ar no verão.....	99
4.4.4	Comparações para a Temperatura Média Radiante no verão	102
5	CONCLUSÃO.....	109
6	PERSPECTIVAS FUTURAS	111
	BIBLIOGRAFIA	112
	ANEXO.....	122
	ANEXO A: Modelo dos questionários validados pela Comissão Ética do IPB que foram aplicados na pesquisa.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Questões para a avaliação sobre a percepção do conforto térmico	45
Tabela 2: Correlação de Pearson entre os pontos para temperatura do ar no dia 16 de janeiro de 2025.....	63
Tabela 3: Correlação de Pearson entre os pontos para temperatura média radiante no dia 16 de janeiro de 2025.....	64
Tabela 4: Correlação de Pearson entre os pontos para temperatura do ar no dia 26 de junho de 2025.....	64
Tabela 5: Correlação de Pearson entre os pontos para temperatura média radiante no dia 26 de junho de 2025.....	65
Tabela 6: Variáveis de agrupamento e de teste para realização do teste de Kruskal–Wallis.....	67
Tabela 7: Correlação de Pearson para a variável Temperatura do Ar entre os 4 pontos do cenário real (CR) e os 4 pontos medidos em campo em 16 de janeiro de 2025	86
Tabela 8: Diferença entre Temperatura do Ar do Equipamento e o Cenário Real Simulado no dia 16 de janeiro de 2025.....	87
Tabela 9: Diferença entre Temperatura Média Radiante do Equipamento e o Cenário Real Simulado no dia 16 de janeiro de 2025.....	88
Tabela 10: Correlação de Pearson para a variável Temperatura do Ar entre os 4 pontos do cenário real (CR) e os 4 pontos medidos em campo no dia 26 de junho de 2025	92
Tabela 11: Diferença entre Temperatura do ar do Equipamento e o Cenário Simulado Real no dia 26 de junho de 2025.....	93
Tabela 12: Diferença entre Temperatura Média Radiante do Equipamento e o Cenário Simulado Real no dia 26 de junho de 2025.....	94
Tabela 13: Parâmetros utilizados para o cálculo do PMV	105
Tabela 14: Valores de PMV obtidos para os quatro pontos de medição.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Dimensões espacial e temporal típicas dos processos atmosféricos, e área relevante para os fenômenos urbanos.....	20
Figura 2 Representação esquemática do balanço térmico da árvore na escala do edifício.	24
Figura 3 Diagrama de conforto de FANGER.....	29
Figura 4: Carta Bioclimática de Olgyay	32
Figura 5: Mapa de localização do IPB	38
Figura 6: Estação Datalogger, Delta Ohm 32.1 (esquerda) e estação Delta Ohm 32.3 (direita)	40
Figura 7: Pontos de medição na Praça José Adriano (IPB)	41
Figura 8: Medidor de distância a laser (LB 500 STABILA).....	42
Figura 9: Cenário real da Praça José Adriano (IPB) modelado no ENVI-met.....	49
Figura 10: Proposta alternativa com a inclusão de vegetação adicional	50
Figura 11: Cenário alternativo da Praça José Adriano (IPB) modelado no ENVI-met	50
Figura 12: Variação da temperatura do ar ao longo do dia em 16 de janeiro de 2025	53
Figura 13:Variação da temperatura do ar ao longo do dia medida em 26 de junho de 2025	55
Figura 14: Variação da temperatura média radiante ao longo do dia medida em 16 de janeiro de 2025	57
Figura 15: variação da temperatura média radiante ao longo do dia medida em 26 de junho de 2025	58
Figura 16: Variação da humidade relativa ao longo do dia medida em 16 de janeiro de 2025.....	60
Figura 17: Variação da humidade relativa ao longo do dia medida em 26 de junho de 2025	61

Figura 18: Variação da velocidade do vento ao longo do dia em 16 de janeiro de 2025	62
Figura 19: Variação da velocidade do vento ao longo do dia em 26 de junho de 2025	62
Figura 20: Variação da temperatura do ar segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 16 de janeiro de 2025.	68
Figura 21: Variação da percepção da temperatura do ar segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 16 de janeiro de 2025.	68
Figura 22: Variação da temperatura do ar segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 26 de junho de 2025.	69
Figura 23: Variação da temperatura média radiante segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 26 de junho de 2025.	70
Figura 24: Variação do isolamento térmico do vestuário (Clo) segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 26 de junho de 2025.....	71
Figura 25: Variação da humidade relativa segundo os níveis de percepção da humidade (AC4) – 16 de janeiro de 2025.....	72
Figura 26: Mapa de resultados da simulação no ENVI-met para o cenário real no dia 16 de janeiro de 2025 (8:00h)	75
Figura 27: Mapa de resultados da simulação no ENVI-met para o cenário real no dia 16 de janeiro de 2025 (14:00h)	75
Figura 28: Mapa de resultados da simulação no ENVI-met para o cenário real em 26 de junho de 2025 (5:00h).....	76
Figura 29: Mapa de resultados da simulação no ENVI-met para o cenário real em 26 de junho de 2025 (14:00h).....	76
Figura 30: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo em 16 de janeiro de 2025 (8:00h)	80
Figura 31: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo em 16 de janeiro de 2025 (14:00h)	80
Figura 32: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo em 26 de junho de 2025 (5:00h).....	81

Figura 33: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo em 26 de junho de 2025 (14:00).....	81
Figura 34: Comparação das curvas do comportamento da Temperatura do ar ao longo do dia nos quatro pontos	84
Figura 35: Comparação das curvas do comportamento da Temperatura do ar no decorrer do dia nos quatro pontos de estudo	90
Figura 36: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 16 de janeiro de 2025 para a temperatura do ar (8:00h)	96
Figura 37: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 16 de janeiro de 2025 para a temperatura do ar (14:00h)	96
Figura 38: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 16 de janeiro de 2025 para a temperatura média radiante (8:00h).....	98
Figura 39: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 16 de janeiro de 2025 para a temperatura média radiante (14:00h).....	98
Figura 40: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura do ar (14:00h)	100
Figura 41: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura do ar (18:00h)	100
Figura 42: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura do ar (6:00h)	101
Figura 43: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura média radiante (6:00h).....	102
Figura 44: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura média radiante (14:00h).....	103
Figura 45: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura média radiante (18:00h).....	103

LISTA DE ABREVIATURAS

ASHRAE	Norma de Conforto Térmico
CA	Cenário Alternativo
CO ₂	Dióxido de Carbono
CR	Cenário Real
CSV	Comma-Separated Values (Formato de exportação de dados)
DEM	Modelo Digital de Elevação
dPET	Temperatura Fisiológica Equivalente Dinâmica
ESTIG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FVC	Fator Visão Céu
HR	Humidade Relativa
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IREQ	Isolamento Requerido para Vestimentas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PET	Temperatura Fisiológica Equivalente
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Percentual de Pessoas Insatisfeitas
SBNs	Soluções Baseadas na Natureza
SDG	Sustainable Development Goals
T _a	Temperatura do Ar
T _{mr}	Temperatura Média Radiante
UTC	Tempo Universal Coordenado
UTCI	Índice Climático Térmico Universal

Va

Velocidade do Ar

WBGT

Wet Bulb Globe Temperature (Índice de Sensação Térmica)

1 INTRODUÇÃO

O rápido e exponencial crescimento da população humana, acompanhado da crescente pressão sobre os territórios, têm provocado transformações significativas no espaço construído, que se torna cada vez mais urbanizado. Essa dinâmica, por sua vez, eleva a vulnerabilidade das populações urbanas aos impactos das mudanças climáticas (Malaguerra, 2021). O espaço construído, constantemente modificado por diversas formas de ocupação do solo, altera as condições meteorológicas locais, criando microclimas específicos. Tais desequilíbrios são impulsionados pela impermeabilização do solo, pelo uso de materiais que conduzem energia térmica, pela poluição atmosférica, pela expansão das edificações e, sobretudo, pela redução da vegetação (Feitosa, 2011).

A mudança climática refere-se a alterações no estado do clima, causadas por processos internos naturais ou por forças externas, como as variações nos ciclos solares, erupções vulcânicas e mudanças persistentes de origem antrópica na composição atmosférica ou no uso do solo (IPCC, 2014). Nesse cenário, a conformação do espaço urbano exerce uma influência significativa sobre o microclima local, afetando diretamente o conforto térmico da população. As transformações no ambiente urbano, ao modificarem a superfície natural, alteram fatores como o albedo e o balanço da radiação, resultando em impactos consideráveis no meio ambiente (Xavier et al., 2021). Neste contexto, o conforto térmico humano é influenciado por diversos elementos climáticos, como temperatura do ar, humidade, velocidade do vento e radiação solar. Desde o século XX, pesquisadores estudam quais condições ambientais são mais adequadas para o bem-estar, utilizando diferentes metodologias para definir limites de conforto e desconforto térmico (Fante, 2019).

As condições de conforto no ambiente externo são parâmetros essenciais para avaliar o microclima e orientar o desenvolvimento de estratégias para um urbanismo sustentável (Coccolo et al., 2016). Nesse contexto, o conforto térmico de um ambiente pode ser definido como a sensação de bem-estar experimentada por uma pessoa, resultante de uma combinação satisfatória de fatores como a temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade do ar, além da atividade realizada e da vestimenta utilizada. Vale ressaltar que o conforto térmico é uma sensação subjetiva, ou seja, varia de acordo com as características individuais das pessoas (Ruas, 1999).

Nesse contexto, a avaliação do conforto térmico surge como uma ferramenta essencial, especialmente quando combinada com programas simuladores de desempenho térmico, para compreender melhor os processos urbanos e os problemas decorrentes deles (Ruas, 1999). O crescente interesse por essa questão tem sido refletido em diversos estudos dedicados ao conforto térmico urbano. Tais estudos são de grande importância, pois impactam diretamente a qualidade ambiental das áreas urbanas, sendo considerados parâmetros essenciais nesse contexto (Paiva, 2010).

Além disso, ao serem analisados juntamente com outras variáveis biológico-fisiológicas e psicológicas, o conforto térmico integra um conjunto de indicadores que definem o conforto ambiental (Paiva, 2010). Dessa forma, estudar e entender os índices de conforto e desconforto térmico permite avaliar se as condições ambientais são favoráveis para a permanência e frequência em determinados espaços (Bentolila et al., 2018). Portanto, analisar as relações entre esses índices de conforto térmico é crucial para garantir o bem-estar da população que utiliza esses ambientes, especialmente em contextos acadêmicos (Alves, 2023).

Diante do contexto apresentado, este estudo partiu da hipótese de que a inserção de vegetação melhora o conforto térmico em espaços abertos do campus. Assim, definiu-se como objetivo geral avaliar as condições microclimáticas e o impacto das Soluções Baseadas na Natureza (SBNs) no conforto térmico na Praça José Adriano (ESTIG) no Instituto Politécnico de Bragança. Como objetivos específicos, pretendeu-se: monitorar variáveis climáticas em dois períodos sazonais distintos; simular e validar cenários microclimáticos no software ENVI-met a partir dos dados medidos em campo; aplicar questionários à comunidade acadêmica (alunos, docentes e funcionários) para avaliar a percepção térmica; e comparar cenários com e sem a implementação de SBNs.

Para alcançar estes objetivos, foram realizados levantamentos das características do ambiente urbano, incluindo edificações, superfícies e vegetação, com posterior modelação tridimensional para a execução das simulações. As principais variáveis que influenciam o conforto térmico exterior (temperatura do ar, humidade relativa, radiação solar, temperatura média radiante e velocidade do vento) foram analisadas e os resultados obtidos foram comparados com parâmetros internacionais, nomeadamente os definidos pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) e pela ISO 7730, uma norma internacional que estabelece métodos para a avaliação analítica e interpretação do conforto térmico em ambientes moderados, com base nos índices PMV (Predicted Mean Vote) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). A proposta fundamenta-se, portanto, na

introdução estratégica de elementos de vegetação, visando a melhoria da qualidade ambiental e da qualidade de vida no campus.

Desta forma, o trabalho foi dividido da seguinte maneira: referencial teórico, materiais e métodos, resultados e discussão e conclusão.

O referencial teórico aborda o uso de simulações para o estudo do microclima urbano, sendo apresentado da seguinte forma: a caracterização do clima urbano, que descreve as condições e variáveis envolvidas; o microclima, que trata das condições climáticas específicas de uma área restrita, considerando a influência da vegetação, dos edifícios e do conforto térmico; e a modelagem microclimática, entendida como o processo de representação numérica e simulação computacional das interações entre superfícies urbanas, atmosfera e elementos naturais, com o objetivo de reproduzir e analisar o comportamento dos sistemas ambientais.

O capítulo de materiais e métodos tem como finalidade descrever a área de estudo e suas particularidades, além de explicar os equipamentos utilizados na coleta de dados. Será detalhado o processo de utilização do software, incluindo a entrada das informações nele. Por último, serão apresentados os cenários implementados no modelo e a análise do conforto térmico.

Em seguida, serão apresentados e analisados os dados meteorológicos e de conforto térmicos, que serão contrastados com resultados das simulações realizadas com os cenários base e com propostas de intervenção. Para o cenário base, será realizada a validação do modelo por meio da comparação entre os resultados simulados e os dados meteorológicos observados em campo, incluindo a análise de correlação e dos padrões térmicos, de forma a avaliar a capacidade do ENVI-met em reproduzir as condições microclimáticas reais.

Ao fim, na conclusão, será feito um resumo dos resultados e uma reflexão sobre eles, apontando possíveis projeções para o futuro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta o enquadramento teórico que sustenta a investigação, abordando os principais conceitos relacionados com o clima urbano, as variáveis microclimáticas e o papel das soluções baseadas na natureza na modulação do ambiente térmico em espaços urbanos.

2.1 CLIMA URBANO

Após a Revolução Industrial, foi possível observar alterações climáticas significativas, decorrentes da urbanização e da intensificação da emissão de poluentes. A evidência das diferenças térmicas entre áreas urbanas e rurais é clara (Santos, 2016). Segundo Oke (2006), o clima urbano pode ser definido como "o clima modificado pela presença de uma cidade ou vila", resultante das transformações causadas pelas superfícies, materiais e atividades presentes nas áreas urbanas nos balanços de energia, massa e movimento. Essas modificações também decorrem da interação entre os fatores urbanos e o clima regional, bem como o ambiente físico pré-existente. Nesse contexto, a meteorologia urbana é entendida como o estudo dos processos físicos, químicos e biológicos que afetam a atmosfera das cidades, enquanto a climatologia urbana se refere ao estudo dos padrões atmosféricos mais frequentes (Andrade, 2005).

O clima dentro das cidades não é algo que acontece de forma aleatória. Ele é resultado direto da maneira como a cidade é construída e utilizada. Elementos como prédios, ruas, pavimentos e a presença ou ausência de áreas verdes influenciam o comportamento do clima local, afetando a temperatura, o vento e a sensação de conforto das pessoas. Por isso, o sistema climático urbano está ligado aos riscos ambientais, como desconforto térmico e ilhas de calor, que são áreas das cidades que apresentam temperaturas mais elevadas que as zonas rurais circundantes devido à urbanização, à redução da vegetação e ao uso de materiais que acumulam calor, interferindo diretamente na qualidade de vida da população. Nesse contexto, as ações humanas têm um papel central na forma como o clima urbano se desenvolve (Pascoalino, 2021).

O clima urbano resulta das modificações causadas pelas características das superfícies, pelos materiais utilizados e pelas atividades desenvolvidas nas cidades, que influenciam os fluxos de energia, massa e movimento (Oke, 1987). Assim, a cidade se torna um fator determinante na modificação do clima. A intensa atividade humana, a grande quantidade de veículos, as indústrias, os edifícios, o asfalto nas ruas e a redução das áreas verdes contribuem para mudanças significativas na atmosfera local. Como resultado,

ocorrem variações na direção e na velocidade do vento, no nível de umidade atmosférica, na distribuição diária da temperatura do ar e nos padrões locais de precipitação (Santos, 2016).

Monteiro (1976) destaca que a cidade gera um clima próprio, o clima urbano, que resulta da interação de diversos fatores sobre a camada limite urbana, os quais atuam no sentido de modificar o clima em uma escala local. Esses efeitos se manifestam diretamente na experiência cotidiana da população, principalmente através de aspectos relacionados ao conforto térmico, à qualidade do ar, aos impactos pluviais e a outras condições que podem desorganizar a vida urbana e comprometer a qualidade de vida de seus habitantes.

A climatologia desempenha um papel importante na definição de modelos urbanos sustentáveis e deve ser integrada ao planejamento urbano em diversas escalas, desde o nível regional até aos projetos de edificações individuais, pois fornece subsídios técnicos para a tomada de decisões relacionadas com a orientação urbana, a escolha de materiais, a inserção de vegetação e a mitigação de ilhas de calor (Andrade, 2005). O crescente interesse pelo clima urbano em cidades de pequeno e médio porte tem gerado pesquisas relevantes, que auxiliam na resolução das questões ambientais enfrentadas por esses centros urbanos (Santos, 2016). Os estudos sobre o clima urbano oferecem dados significativos sobre os principais componentes e condições ambientais de uma cidade, permitindo a identificação de problemas ambientais resultantes da interação entre o ambiente urbano e a atmosfera. Esses estudos também consideram os diferentes níveis de interferência humana, o que é essencial para orientar estratégias de planejamento mais resilientes e adaptadas às dinâmicas climáticas locais (Pascoalino, 2021).

2.1.1 Escalas do clima urbano

Uma escala é uma referência de valor baseada em critérios essenciais para entender um fenômeno. Os estudos climáticos devem considerar tanto a extensão espacial quanto a duração temporal dos fenômenos. A definição de intensidade, frequência e tipo de clima depende de uma abordagem adequada no espaço e no tempo, além de técnicas apropriadas para análise e comunicação dos resultados. O clima resulta de fenômenos interligados que se manifestam simultaneamente no espaço e no tempo, envolvendo elementos diversos que trocam energia entre si. A abordagem racional exige uma escala metodológica, como uma taxonomia, para a pesquisa climatológica (Ribeiro, 1993).

A necessidade de conceitos claros e terminologia acessível levou à criação de categorias espaciais discretas, embora essas categorias sejam arbitrárias, pois os fenômenos atmosféricos são contínuos por natureza (Oke, 1987). Cada nível escalar precisa ser adequado ao fenômeno climático em questão, garantindo a coerência entre sua

extensão, duração e as técnicas de coleta de dados, análise estatística e apresentação gráfica e cartográfica (Ribeiro, 1993). Uma taxonomia climática, que considere a variabilidade espaço-temporal, deve incorporar os elementos definidores do clima em todas as escalas (Ribeiro, 1993).

A compreensão do conceito de escala é fundamental para o sucesso das estações urbanas. Oke (1984) descreve três escalas relevantes para o estudo do clima urbano (Figura 1):

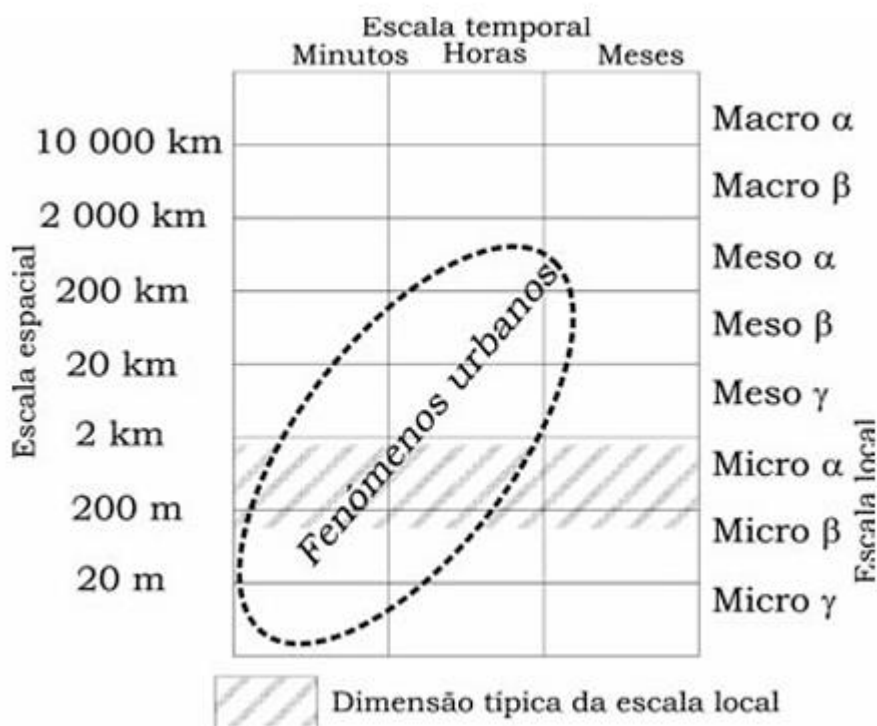


Figura 1: Dimensões espacial e temporal típicas dos processos atmosféricos, e área relevante para os fenômenos urbanos

(a) Microescala – Refere-se ao microclima de superfícies e objetos individuais, onde a temperatura e o fluxo de ar podem variar significativamente em distâncias muito curtas, como entre metros ou milímetros. Os microclimas urbanos se relacionam com características como edifícios, árvores, ruas e jardins, abrangendo distâncias de menos de um metro até algumas centenas de metros.

(b) Escala Local – Esta é a escala típica das estações climáticas padrão, focando em características da paisagem, como a topografia, mas sem considerar os efeitos da microescala. Nas áreas urbanas, ela abrange o clima de bairros, levando em conta o tipo de desenvolvimento urbano, como a cobertura do solo, o tamanho e o espaçamento dos edifícios, e as atividades presentes. A escala local varia de um a vários quilômetros.

(c) Mesoescala – A cidade influencia o clima em uma escala maior, abrangendo toda a área urbana, com dimensões que podem chegar a dezenas de quilômetros. Nesta escala, uma única estação climática não é suficiente para representar as variações.

De acordo com Pascoalino (2021), dentro da subdivisão do clima local encontra-se o mesoclima, que resulta da combinação de diferentes topoclimas definidos pela morfologia do ambiente urbano. Os topoclimas englobam tanto as características geográficas quanto a estrutura construída que influencia o clima local, enquanto os microclimas estão associados a diferentes tipos de espaços urbanos, como ruas, praças, áreas verdes, zonas residenciais, comerciais e institucionais, variando conforme a configuração do ambiente e o uso do solo.

Segundo Andrade (2005), a atmosfera urbana é dividida em duas camadas principais: a Camada de Dossel Urbano (UCL) e a Camada Limite Urbana (UBL). A UCL é diretamente influenciada pelo entorno urbano, enquanto a UBL reflete os efeitos térmicos integrados de toda a cidade, podendo se estender em direção ao vento, formando uma pluma urbana. A camada inferior da UBL é a subcamada de rugosidade, onde o fluxo de ar é afetado pelos elementos individuais da cidade.

2.2 MICROCLIMA

As atividades humanas em ambientes urbanos têm um impacto significativo na transformação da paisagem, o que resulta em alterações no microclima local. Nesse contexto, observa-se uma negligência na manutenção da vegetação nas vias públicas e áreas comuns, o que contribui para a degradação do microclima nas cidades. Dessa forma, os materiais utilizados no planejamento urbano e a falta de vegetação têm provocado mudanças significativas nas características climáticas dos centros urbanos (Bernatzky, 1982).

O conceito de microclima refere-se ao clima de áreas restritas e localizadas, como ruas, edifícios ou parques, sendo influenciado por elementos específicos presentes nesse espaço e pela organização desses elementos. Os microclimas surgem da interação de

fatores ambientais que alteram os fluxos de energia, umidade, massa e movimento (Nóbrega & Lemos, 2011).

No mesmo sentido, Monteiro (2008) afirma que os aspectos microclimatológicos presentes na interação entre o ser humano e o ambiente estão diretamente relacionados às condições do espaço. Quatro parâmetros climáticos são determinantes para essa interação: temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento e radiação térmica.

2.2.1 Influência dos materiais no microclima urbano

O clima local é influenciado por diversos fatores, incluindo as características das superfícies urbanas. Os materiais de construção desempenham um papel fundamental na formação dos microclimas urbanos, influenciando tanto o equilíbrio térmico quanto o hídrico das cidades. A textura e a forma das superfícies afetam a circulação do ar, alterando sua velocidade. No que diz respeito às trocas de energia, a capacidade dos materiais de absorver, armazenar e emitir calor impacta diretamente o clima urbano (Tojo et al., 2013). Dessa forma, a escolha dos materiais construtivos é fundamental para o conforto térmico local, pois os revestimentos podem absorver ou refletir a radiação solar (Skubs, 2009).

Além das propriedades dos materiais, fatores como a extensão das superfícies e sua organização espacial também interferem nesse processo. Como absorvem e emitem radiação térmica, os materiais de construção influenciam a temperatura do ar e o conforto térmico nas áreas públicas, contribuindo para o balanço energético da cidade e para o efeito de ilha de calor, especialmente à noite (Tojo et al., 2013).

Teza e Baptista (2005) reforçam que a escolha dos materiais empregados nas edificações impacta diretamente na refletividade ou albedo, uma vez que materiais distintos absorvem diferentes quantidades de radiação solar, influenciando a emissão de calor pelas superfícies. O albedo, do ponto de vista geográfico, representa a relação entre a quantidade de luz refletida pela superfície terrestre e a quantidade de luz recebida do Sol, variando conforme os materiais presentes na superfície (Romero, 2011).

2.2.2 Influência da vegetação no ambiente urbano

Uma das principais causas das mudanças climáticas nos grandes centros urbanos é a ausência de vegetação. Com o crescimento descontrolado das cidades, grande parte das áreas verdes é removida para dar lugar à expansão urbana (Abreu, 2008). As árvores

desempenham um papel fundamental na adaptação ambiental, atendendo às necessidades de conforto térmico (Milano & Dalcin, 2000). Além disso, conforme apontado por Bowler (2010), elas se destacam como uma das soluções baseadas na natureza mais eficazes e versáteis para melhorar a qualidade ambiental nas cidades.

Nos últimos anos, diversas pesquisas têm ressaltado os benefícios das árvores nos ambientes urbanos, evidenciando seu papel como termorreguladores naturais. Elas contribuem para o conforto térmico, bem-estar psicológico e fisiológico da população. O plantio de árvores apresenta-se como uma alternativa prática e econômica, associada à eficiência energética (Bretz et al., 1998). Barbosa (2005), ao investigar a relação entre áreas verdes e qualidade térmica no ambiente urbano, identificou que a vegetação influencia significativamente de forma benéfica quatro fatores climáticos: temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento.

A presença de árvores nas cidades impacta a temperatura do ar em diferentes escalas, desde a nível das ruas até mudanças mais amplas no ambiente urbano. Quando agrupada, a vegetação potencializa seus efeitos, podendo gerar impactos que não ocorrem com poucas plantas isoladas. As árvores bloqueiam a radiação solar direta de ondas curtas e absorvem a radiação térmica emitida pelos edifícios e pavimentos, ajudando a reduzir a temperatura ao redor, especialmente durante o dia. Além disso, o processo de transpiração das folhas libera vapor d'água, contribuindo para o resfriamento do ar (Tojo et al., 2013).

O efeito da vegetação no microclima ocorre principalmente por meio de dois mecanismos: evapotranspiração e sombreamento. A evapotranspiração está relacionada à resistência estomática, que depende da quantidade de estômatos nas folhas e das condições do solo (disponibilidade de água) e da atmosfera (incidência de luz) (Matheus et al., 2016). Oke (1978) destaca que a vegetação não apenas proporciona sombra, mas também auxilia na redução da temperatura através da evaporação de calor latente. (Figura 2):

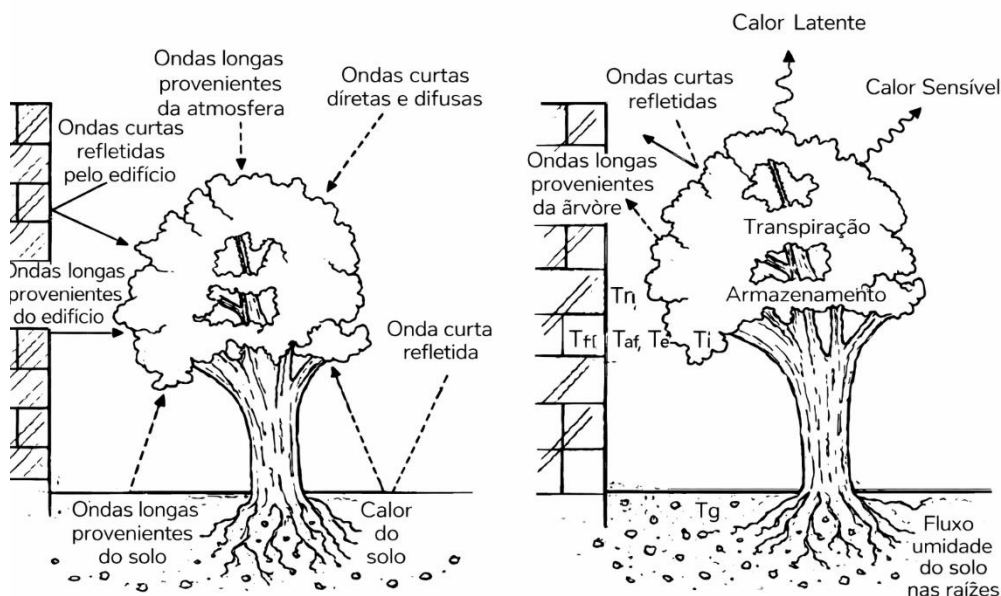


Figura 2 Representação esquemática do balanço térmico da árvore na escala do edifício.

Além de promover conforto térmico, a cobertura vegetal nas cidades traz diversos benefícios à qualidade ambiental urbana. Ela contribui para a melhoria da qualidade do ar ao reter partículas de poeira e poluentes gasosos, além de realizar a fixação de dióxido de carbono (CO_2) por meio da fotossíntese, removendo esse gás da atmosfera e convertendo-o em biomassa, o que auxilia na mitigação dos impactos das atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis por veículos e indústrias. Simultaneamente, as plantas liberam oxigênio na atmosfera, contribuindo para a qualidade do ar. Além disso, a presença de vegetação melhora o conforto térmico dos pedestres e diminui o consumo de energia com resfriamento em edificações (Oke, 2011). Contudo, a implementação de áreas verdes em meio urbano apresenta desafios, como a necessidade de manutenção contínua da vegetação, a disponibilidade limitada de espaço em áreas densamente construídas e os custos associados à implantação e gestão desses elementos.

2.2.3 Influência dos edifícios no microclima urbano

A forma urbana e suas características, como rugosidade, densidade construtiva, dimensões das estruturas urbanas (tanto na horizontal quanto na vertical), padrão de ocupação, permeabilidade do solo, orientação dos edifícios e materiais utilizados, exercem forte influência sobre as variáveis do microclima (Oke et al., 2017).

Em regiões densamente edificadas, grande parte da radiação solar é absorvida ou refletida por superfícies construídas, enquanto o solo e as partes inferiores das fachadas permanecem sombreados durante a maior parte do dia. Nessas áreas, a exposição solar direta é limitada, predominando a radiação difusa do céu e a radiação refletida de outras superfícies. No entanto, essa reflexão pode ser mínima em superfícies com baixo albedo. Vale ressaltar que a radiação incidente em fachadas elevadas não é eliminada do sistema climático urbano, continuando a influenciar o microclima local (Gusson, 2020).

A configuração tridimensional dos edifícios e dos espaços entre eles, conhecida como morfologia urbana, influencia diretamente fatores microclimáticos como o vento, a radiação solar e a temperatura do ar. Historicamente, as cidades foram projetadas considerando o clima local para melhorar o conforto térmico em espaços públicos e construções. Em regiões frias, as formas urbanas foram desenvolvidas para maximizar a entrada de luz solar e minimizar a ação dos ventos de inverno. Já em climas quentes, o objetivo tem sido favorecer a ventilação natural e reduzir a exposição direta ao sol em áreas de convivência e edifícios (Tojo et al., 2013).

A geometria urbana, sua orientação em relação ao sol e ao céu, bem como as propriedades radiantes dos materiais utilizados, desempenham um papel fundamental nas trocas de radiação em ambientes urbanos. O gerenciamento dessas trocas através do design arquitetônico e do planejamento paisagístico é uma estratégia essencial para arquitetos, urbanistas e paisagistas que visam controlar o microclima urbano (Oke et al., 2017).

O planejamento urbano também influencia significativamente a ventilação em áreas densamente construídas, podendo bloquear ou canalizar o fluxo de ar, afetando a velocidade e a distribuição do vento. A utilização de edificações com alturas variadas, aberturas distribuídas ao longo das fachadas, espaços entre pódios e configurações não alinhadas são estratégias eficazes para otimizar a ventilação urbana e melhorar o conforto térmico em regiões de clima tropical (NG, 2016).

2.2.4 Fator de Visão de Céu

A configuração urbana pode ser caracterizada tanto pela relação entre a altura das edificações e a largura das vias (relação H/W) quanto pelo fator de visão do céu (FVC). O FVC é uma métrica mais adequada para descrever a geometria da radiação em um determinado local, pois expressa a porção do céu acessível para a troca de calor. Esse fator quantifica a área do céu visível a partir de um ponto específico dentro do ambiente urbano e

está associado a diversos processos ambientais. Conhecido também como fator de forma ou de configuração, o FVC é um parâmetro adimensional que indica a extensão do céu visível em determinado ponto (Oke, 1981).

A geometria urbana é frequentemente interpretada pelo fator de visão do céu, por ser um dos principais fatores que contribuem para a formação de ilhas de calor urbanas, conforme apontado por Oke (1982). Isso ocorre porque o resfriamento das superfícies terrestres depende diretamente da quantidade de céu visível em um ponto específico.

O fator de visão do céu (FVC), também conhecido como fator de configuração ou fator angular, é um parâmetro adimensional que representa a relação geométrica entre a Terra e o céu, estimando a área de céu visível a partir de um ponto específico. O FVC varia de 0 a 1, em que o valor 1 representa uma área completamente desobstruída, sem qualquer obstáculo bloqueando a visão do céu. Como o céu geralmente apresenta temperaturas mais baixas que a superfície terrestre, ele desempenha um papel crucial no balanço de energia (Souza et al., 2010).

2.3 VARIÁVEIS DO CLIMA URBANO

O clima urbano é formado por diversas variáveis interligadas, de modo que qualquer alteração em uma delas impacta diretamente as demais. Conforme os princípios da termodinâmica, a energia absorvida por um sistema deve ser dissipada para o ambiente ou armazenada para ser liberada posteriormente (Costa, 1982).

A principal fonte de energia no ambiente urbano é a radiação solar, que chega à superfície terrestre como uma forma de energia eletromagnética de onda curta, após passar parcialmente pela atmosfera. Nas cidades, a maneira como essa radiação é absorvida ou refletida varia conforme os materiais empregados nas edificações e a configuração do espaço construído. Esses fatores influenciam diretamente a retenção e a dissipação do calor ao longo do dia e da noite, impactando o microclima urbano (Frota & Schiffer, 2003). Diferente da temperatura do ar, que é mais difícil de controlar em espaços abertos, a radiação solar pode ser gerenciada por meio de estratégias de adaptação bioclimática (Erell et al., 2010). Essas estratégias incluem a definição de elementos urbanos que favorecem ou limitam a incidência solar, conforme as necessidades climáticas e microclimáticas locais. A quantidade de radiação disponível em um ambiente urbano é influenciada por fatores como a densidade e altura das edificações, largura das ruas, presença de áreas abertas e a topografia do

terreno, bem como pela orientação das vias e demais características estruturais da cidade (Tojo et al., 2013).

A água, em suas diferentes formas, tem um papel importante no microclima das cidades, fazendo parte do ciclo urbano principalmente por meio da chuva, podendo infiltrar-se no solo ou escoar por canais naturais e artificiais. Além disso, a evapotranspiração das plantas e a presença de rios ou lagos próximos influenciam a umidade do ar, que é essencial para definir o clima urbano e garantir o conforto térmico. A umidade relativa, que mostra em porcentagem a quantidade de vapor d'água no ar em relação ao máximo que ele pode conter na mesma temperatura, é um dos principais fatores usados para medir o conforto térmico. Esse índice pode ser ajustado para ajudar a resfriar o ar, mas, se for muito alto, pode causar desconforto (Tojo et al., 2013).

O vento é o movimento do ar causado pela diferença de pressão atmosférica, sempre indo das áreas de alta para baixa pressão. Em espaços abertos, ele tende a manter sua direção, mas nas cidades, fatores como relevo, áreas verdes, orientação das ruas e altura dos prédios podem mudar sua velocidade e trajetória. A presença de muitos edifícios reduz sua velocidade e pode criar efeitos aerodinâmicos específicos, dificultando a dispersão do calor e contribuindo para o fenômeno da ilha de calor (Frota & Schiffer, 2003). A ventilação natural é uma estratégia importante para o conforto térmico em climas quentes ou temperados, principalmente no verão, pois ajuda a refrescar os espaços urbanos. Porém, o vento também pode causar desconforto, seja pelo impacto direto ou pela sensação térmica, especialmente no inverno, quando pode aumentar a perda de calor. Por isso, é necessário adotar medidas que favoreçam ou reduzam sua ação dependendo da estação do ano (Tojo et al., 2013).

2.4 CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico pode ser entendido como a sensação de bem-estar vivenciada por um indivíduo, resultante da interação equilibrada entre a temperatura média radiante, a umidade relativa, a temperatura e a movimentação do ar, considerando ainda a atividade realizada e o tipo de vestimenta utilizada (Ruas, 1999). Esse conceito indica o nível de satisfação térmica em determinado espaço, sendo alcançado quando as condições térmicas estão adequadas ao corpo humano. Caso contrário, ocorre uma sensação de desconforto térmico, caracterizando um ambiente como inadequado para aquele indivíduo (Bentolilla et al., 2018).

A exposição a condições térmicas adversas pode levar ao estresse térmico, seja pelo excesso de calor ou pelo frio intenso, impactando tanto a saúde quanto o desempenho das

pessoas (Frota & Schiffer, 2003). O equilíbrio térmico do organismo está diretamente ligado à sensação de conforto, pois essa sensação depende do esforço que o sistema termorregulador precisa fazer para manter a temperatura corporal. Quanto maior for essa demanda, mais acentuado será o desconforto térmico (Ruas, 1999).

A percepção do conforto térmico de um indivíduo é influenciada por fatores físicos, que determinam as trocas de calor entre o corpo e o ambiente, e por aspectos psicológicos. Essa variabilidade explica a dificuldade em estabelecer métodos de avaliação do conforto térmico plenamente eficazes. Assim, é comum que, em um mesmo ambiente e sob as mesmas condições térmicas, algumas pessoas se sintam confortáveis enquanto outras não (Nicol et al., 1995). Dessa forma, definir um ambiente térmico que atenda plenamente a todos os usuários é um desafio. No entanto, é possível estimar condições adequadas com base em parâmetros individuais e ambientais, criando ambientes que sejam aceitáveis para um número significativo de pessoas (ISO 7730, 2005).

A busca por compreender como as pessoas percebem a temperatura ao serem expostas a diferentes combinações de variáveis ambientais e pessoais levou ao desenvolvimento de índices de conforto térmico. Esses índices representam a influência combinada dos principais fatores envolvidos, permitindo avaliar o nível de conforto de um ambiente e fornecer suporte técnico para a sua adequação às necessidades térmicas dos utilizadores. O método mais amplamente utilizado para essa avaliação é o Voto Médio Estimado (VME), criado por Ole Fanger e apresentado em sua publicação de 1970 (FANGER, 1970).

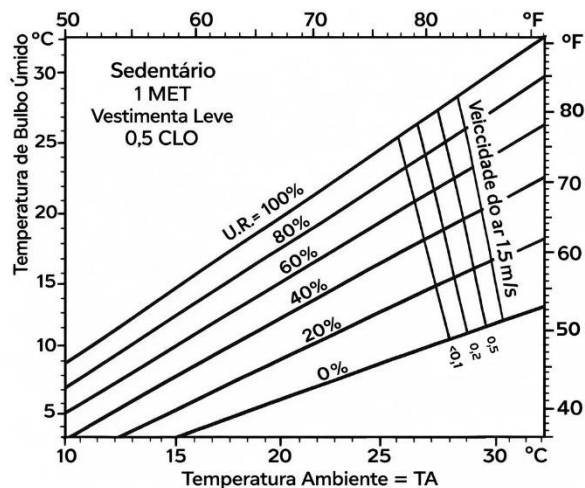


Figura 3 Diagrama de conforto de FANGER

Os diagramas de conforto (Figura 3) ilustram as combinações de variáveis que proporcionam condições térmicas agradáveis. No entanto, do ponto de vista prático, também era essencial compreender o nível de desconforto experimentado por indivíduos em ambientes cujas condições diferissem daquelas consideradas ideais para o conforto térmico (Ruas, 1999).

Para isso, Fanger (1970) estabeleceu um critério de avaliação desse desconforto, associando os fatores que influenciam o conforto térmico a uma escala de sensação térmica por ele definida. Esse critério ficou conhecido como Voto Médio Estimado (VME), um índice que segue uma escala de sete pontos: +3 (muito quente), +2 (quente), +1 (ligeiramente quente), 0 (neutro/confortável), -1 (ligeiramente frio), -2 (frio) e -3 (muito frio). Essa escala representa a média da percepção térmica de um grande grupo de indivíduos, sendo calculada com base em variáveis ambientais, como temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade do ar, além de variáveis pessoais, como taxa metabólica e isolamento térmico das vestimentas.

2.4.1 Fatores que influenciam o conforto térmico

A percepção de conforto térmico de uma pessoa em relação ao ambiente ao seu redor é influenciada por aspectos individuais e ambientais. Pesquisas realizadas nas últimas décadas destacam, ainda, a importância de fatores subjetivos na determinação do conforto

térmico. Baker e Standeven (1996) apontam que essa percepção depende das "oportunidades adaptativas" disponíveis. Já Nikolopoulou e Steemers (2003) classificam essas oportunidades em três categorias: físicas, fisiológicas e psicológicas.

Parâmetros Ambientais

De acordo com Fanger (1970), as variáveis ambientais relevantes para os estudos sobre conforto térmico incluem: temperatura do ar (T_a [°C]), temperatura média radiante (T_{mr} [°C]), velocidade do ar (v_{ar} [m/s]) e umidade relativa (HR [%]). A medição desses fatores requer equipamentos técnicos específicos para garantir precisão nos resultados.

A temperatura do ar é um dos principais elementos na determinação do conforto térmico e corresponde à temperatura de bulbo seco. Esse parâmetro é essencial para avaliar a troca de calor por convecção entre o corpo humano e o ambiente térmico (ISO 7726, 1998).

A temperatura média radiante representa a temperatura uniforme de uma superfície hipotética que teria a mesma troca de calor por radiação que o ambiente real, mesmo quando este não é termicamente homogêneo. Para medi-la, utiliza-se um termômetro de bulbo negro (ASHRAE 55, 2010).

A velocidade do ar influencia a sensação térmica, pois afeta as trocas de calor por convecção e evaporação entre o corpo e o ambiente. Além disso, pode gerar desconforto localizado em razão da presença de correntes de ar (ISO 7730, 2005).

A umidade relativa do ar é um parâmetro utilizado para determinar a pressão parcial do vapor de água (P_a [Pa]). Esse vapor se forma pela evaporação da água, e, quando o ar atinge seu ponto de saturação, ocorre condensação, resultando em transferência de calor. Esse processo influencia diretamente a sensação térmica e pode impactar o conforto de um ambiente (Almeida, 2011).

Parâmetros Individuais

Os fatores individuais que afetam o conforto térmico incluem a atividade metabólica (M [met]) e a resistência térmica do vestuário (I_{cl} [clo]). Ambos possuem valores padronizados segundo as normas ISO 7730 (2005) e ASHRAE 55 (2010).

A atividade metabólica corresponde à taxa de produção de energia pelo organismo durante a realização de uma determinada atividade. Essa taxa varia de acordo com o esforço físico realizado, sendo expressa na unidade "met". Um valor de 1 met ($1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$)

representa a energia gerada por uma pessoa sentada e em repouso (ASHRAE 55, 2010; ISO 7730, 2005).

O vestuário atua como uma barreira térmica entre o corpo humano e o ambiente, reduzindo as trocas de calor. A resistência térmica das roupas é medida em "clo", onde 1 clo (1 clo = 0,155 m²·°C/W) equivale à resistência térmica oferecida por um traje padrão masculino. O valor total da resistência do vestuário pode ser calculado pela soma dos valores individuais de cada peça de roupa utilizada (ASHRAE 55, 2010; ISO 7730, 2005).

2.4.2 Carta Bioclimática de Olgay

Na década de 1960, os irmãos Olgay desenvolveram um diagrama baseado na relação entre temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar, considerando dados climáticos de diferentes períodos do ano. Esse estudo permitiu a definição de estratégias para adaptação das edificações ao clima, categorizando diferentes regiões em zonas de conforto (Russi, 2012).

O gráfico apresenta uma zona de conforto central, enquanto as variáveis climáticas são representadas por curvas ao redor (Figura 4). Essas curvas indicam os ajustes necessários para atingir o conforto térmico em pontos situados fora da área central. O diagrama dispõe os valores de temperatura no eixo vertical e os de umidade no eixo horizontal, destacando uma zona neutra de conforto, cuja amplitude pode variar de acordo com cada indivíduo (Olgay, 1963).

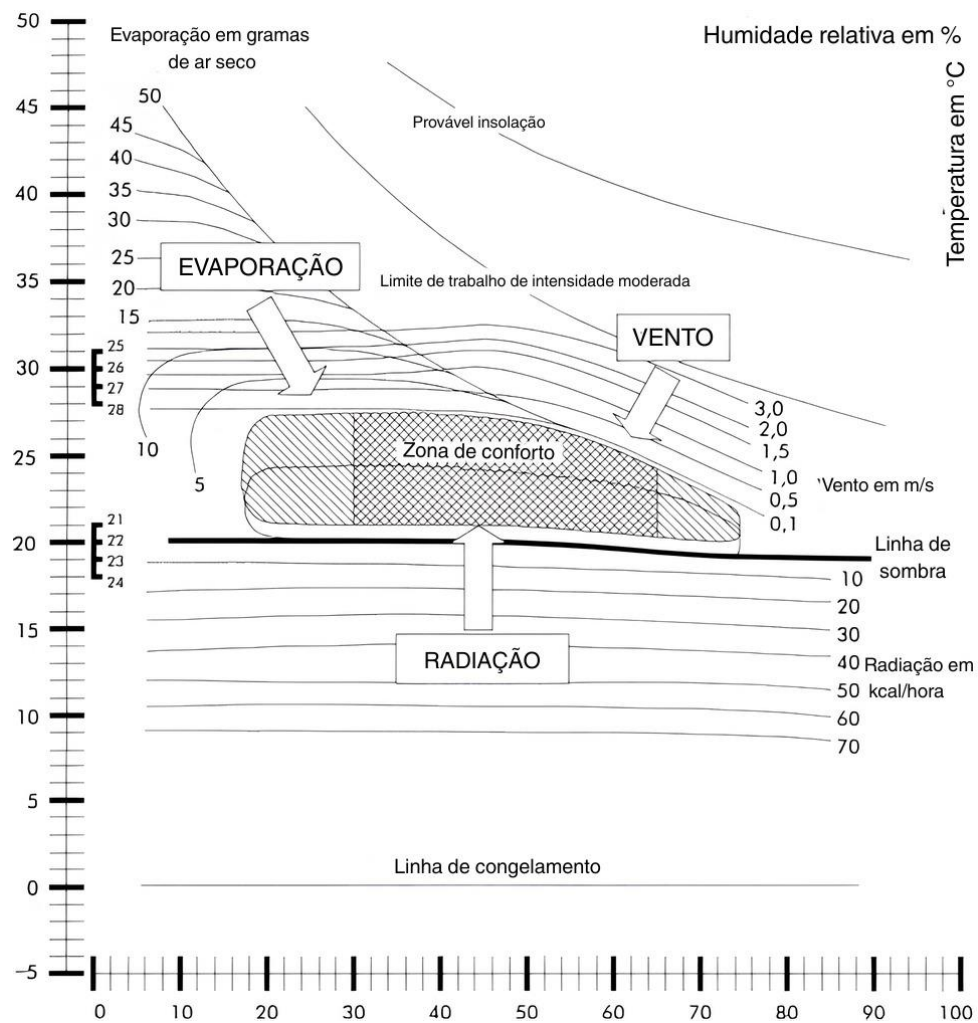


Figura 4: Carta Bioclimática de Olgyay

2.5 SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

O conceito de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) começou a se consolidar no final da década de 2000 e, desde então, tem recebido crescente atenção por parte de organismos internacionais e da União Europeia (UE), sendo visto como uma estratégia para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, CGEE, 2020).

As SbN são definidas como intervenções que utilizam processos e elementos naturais como referência para promover benefícios simultâneos em diferentes esferas, incluindo a social, ambiental e econômica. Por ser um conceito relativamente recente, ainda há variações nas definições e abordagens sobre as SbN. No entanto, a ideia central gira em torno do aproveitamento da natureza como um meio economicamente viável para

impulsionar o desenvolvimento humano (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, CGEE, 2020).

A natureza serve de modelo para essas soluções, projetadas para gerar impactos positivos em diversos aspectos. A União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), entidade responsável pela introdução do termo, descreve as SbN como "ações voltadas para a proteção, gestão sustentável e restauração de ecossistemas naturais e modificados, que enfrentam desafios sociais de maneira eficiente e adaptável, garantindo o bem-estar humano e a conservação da biodiversidade" (Evers et al., 2022).

No contexto europeu, esse conceito tem sido amplamente aplicado nas cidades, valorizando a contribuição da natureza e da biodiversidade para melhorar a qualidade de vida, a resiliência urbana e a criação de oportunidades econômicas. Exemplos de iniciativas de SbN incluem a implementação de parques urbanos, jardins de chuva, áreas úmidas artificiais, telhados verdes e práticas de agricultura urbana. Essas estratégias aproveitam os serviços ecossistêmicos para reduzir a vulnerabilidade dos centros urbanos a eventos climáticos extremos (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos [CGEE], 2020).

Contudo, nem toda solução ambientalmente sustentável pode ser considerada uma SbN. Para se enquadrar, a intervenção deve estar diretamente ligada a ecossistemas funcionais e, de acordo com diversas instituições que estudam essa abordagem, devendo gerar benefícios concretos para a biodiversidade e a integridade ecológica. Exemplos de soluções sustentáveis que não se qualificam como SbN incluem painéis solares, aerogeradores e sistemas de captação de água da chuva, pois, embora contribuam para a sustentabilidade, não se baseiam em processos ecossistêmicos naturais (Evers et al., 2022).

2.6 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Atualmente, diversos modelos são utilizados para pesquisas e, na Climatologia, eles são aplicados tanto na modelação microclimática quanto na previsão em escalas regional e global, na criação e simulação de cenários, na análise de índices e na avaliação do impacto de variáveis meteorológicas, entre outras aplicações. A escolha do modelo adequado depende do nível de informação disponível sobre o sistema, da elaboração e interpretação desses dados, da compreensão dos fenômenos climáticos envolvidos e da complexidade inerente ao comportamento desses sistemas (Madureira, 1992).

Segundo Carfan et al. (2009), no estudo do clima urbano, muitos pesquisadores têm recorrido a modelos para simular a dinâmica atmosférica. Alguns estudos obtiveram

resultados altamente representativos da realidade, evidenciando a importância dos modelos como ferramentas fundamentais para descrever e analisar detalhadamente os processos climáticos subjacentes.

Além disso, os modelos permitem a simulação de diferentes cenários considerando as influências antrópicas existentes, possibilitando projeções do clima no passado, no presente e no futuro (Carfan et al., 2009). A modelagem corresponde ao processo de criação dos modelos, enquanto a simulação refere-se à sua execução, sendo importante a calibração dos modelos com dados obtidos por meio de monitoramento (Kobiyama & Manfroi, 1999).

Ferreira (2014) destaca que esses modelos oferecem uma visão integrada do ambiente ao considerar simultaneamente fatores físicos (clima, topografia, hidrografia, declividade), bióticos (vegetação) e socioeconômicos (edificações, impermeabilização, fator de visão do céu, vias de circulação, áreas verdes, entre outros). Isso permite a operacionalização conjunta de um grande número de variáveis.

Os modelos de microclima urbano variam conforme sua base física e resolução temporal e espacial. Em microescala, os modelos tridimensionais baseados em Dinâmica dos Fluidos Computacional permanecem fundamentais para a representação do fluxo de vento. Contudo, avanços recentes têm ampliado a incorporação de processos hidrotérmicos e energéticos, impulsionados pelo aumento da capacidade computacional e pelo desenvolvimento de estratégias de acoplamento com modelos de energia de edifícios. Apesar desses progressos, o uso de parametrizações para reduzir o custo computacional ainda é frequente, em que a literatura recente destaca abordagens híbridas e maior validação com dados observacionais (Toparlar et al., 2017; Li et al., 2022; Sezer et al., 2023).

A modelagem do conforto térmico exterior, por sua vez, é frequentemente abordada por meio de metodologias simplificadas, nas quais diversos processos atmosféricos complexos não são explicitamente modelados, sendo representados por dados meteorológicos fornecidos pelo usuário, como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação. Essas abordagens pressupõem a disponibilidade de dados provenientes de medições in situ ou de bases climatológicas confiáveis, sendo amplamente utilizadas em estudos de avaliação do conforto térmico em ambientes urbanos, tanto em análises comparativas quanto em aplicações de planejamento urbano (Liu et al., 2023).

2.6.1 ENVI-met

O software ENVI-met é uma ferramenta amplamente utilizada para simular a evolução temporal de parâmetros termodinâmicos em microescala, fornecendo um modelo tridimensional não hidrostático que representa as interações entre edifícios, vegetação e atmosfera (Berardi et al., 2016). Com fundamentos físicos baseados na mecânica dos fluidos, termodinâmica e leis da física atmosférica, o ENVI-met permite calcular campos tridimensionais de vento, turbulência, temperatura e umidade do ar, além de fluxos radiativos e dispersão de poluentes (Bruse, 1999). A alta resolução espacial do modelo e sua capacidade de detalhar a vegetação possibilitam a simulação de taxas individuais de fotossíntese, levando em conta fatores como radiação solar, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e concentração de CO₂ (Bruse, 2004b; Simon, 2016).

Conforme Bruce (2004), o ENVI-met auxilia na realização de simulações computacionais, análises ambientais e bioclimáticas, permitindo a validação de condições microclimáticas. Utilizando parâmetros da dinâmica dos fluidos, essa ferramenta possibilita a avaliação de estratégias antes de sua implementação, seja em cenários reais ou hipotéticos.

Do ponto de vista físico, o ENVI-met baseia-se na resolução das equações fundamentais que descrevem o comportamento do ar em microescala urbana, chamadas de equações de conservação da massa, do momento e da energia, derivadas das equações de Navier–Stokes para escoamentos atmosféricos não hidrostáticos. A turbulência atmosférica é representada por meio de esquemas de parametrização desenvolvidos especificamente para a escala urbana, os quais permitem simular de forma realista a mistura do ar e a redistribuição do vento ao longo do espaço urbano. Esses esquemas descrevem como o escoamento é alterado pela presença de edifícios, ruas e outros obstáculos, influenciando a ventilação, a formação de zonas de estagnação e os padrões locais de circulação do ar. (Bruse, 1999; Huttner & Bruse, 2009).

O modelo considera também o balanço energético das superfícies urbanas, integrando os fluxos de radiação de onda curta e longa, as trocas convectivas de calor sensível e os processos evaporativos associados ao solo e à vegetação. A vegetação é descrita por modelos fisiológicos que representam a transpiração e a resistência estomática, bem como as trocas de calor latente e sensível com a atmosfera, possibilitando a análise do seu papel na modulação do microclima urbano. A abordagem do modelo ENVI-met procura equilibrar o nível de detalhe físico com a viabilidade computacional, permitindo a sua

aplicação em estudos ambientais e bioclimáticos em contexto urbano (Bruse, 2004a; Salata et al., 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Bragança é uma cidade de pequena dimensão, com aproximadamente 25.000 habitantes, localizada no nordeste de Portugal. Está localizada em uma região montanhosa e possui uma forma urbana diversificada (Bragança, 2008). Sua área urbana apresenta uma diversidade de edificações, abrangendo tanto bairros compostos por residências unifamiliares e multifamiliares quanto zonas destinadas ao comércio e à indústria. A economia do município é majoritariamente sustentada pelo setor de serviços, especialmente os de natureza pública, enquanto a atividade industrial possui uma relevância limitada (Gonçalves, 2018).

A pesquisa foi realizada no Campus do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), localizado na Zona de Santa Apolónia, em Bragança (Figura 5). O Instituto Politécnico de Bragança (IPB) atua em estreita relação com a sociedade, incluindo a cooperação transfronteiriça, com o objetivo de fortalecer a coesão territorial e sua projeção em âmbito nacional e internacional. Sua missão está voltada para o desenvolvimento regional, com base na inovação e na geração e disseminação do conhecimento técnico-científico. Além disso, o IPB incentiva a mobilidade de estudantes e diplomados, tanto dentro do país quanto no exterior, especialmente no contexto do espaço europeu de ensino superior e da comunidade de países de língua portuguesa. A instituição também se envolve, diretamente ou por meio de suas unidades, em iniciativas voltadas para a sociedade, promovendo a difusão, transferência e valorização do conhecimento (Instituto Politécnico de Bragança, 1983/2025). Tendo em vista sua relevância, a área do IPB se mostra propícia para a realização da pesquisa proposta.

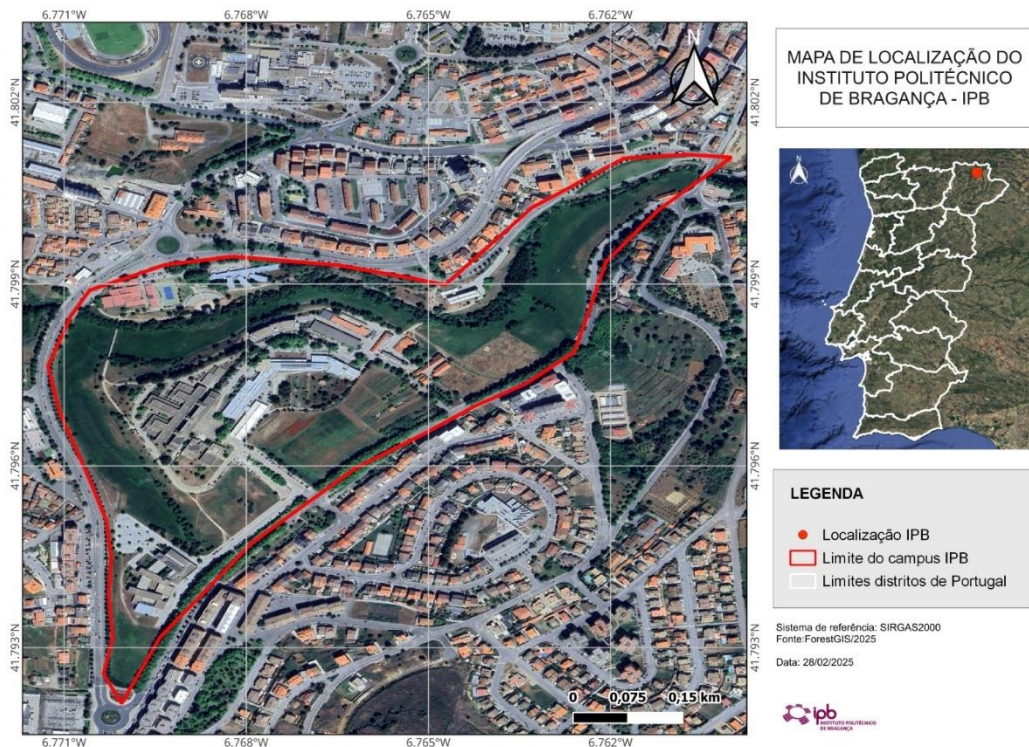


Figura 5: Mapa de localização do IPB

Sendo assim, foi selecionado um local dentro do campus do IPB para a aplicação deste estudo. A Praça José Adriano (IPB) é uma área cercada por edifícios, com alturas entre 6 e 7 metros, apresenta grande parte da superfície empedrada com pequenas áreas de relva. Além disso, possui 14 árvores dentro do local de pesquisa. Este local é significativo devido ao intenso fluxo de pessoas, o que torna essencial o estudo do conforto térmico, considerando a elevada presença de elementos artificiais na área.

3.2 CLIMA DA REGIÃO

O clima do território continental de Portugal pode ser classificado dentro de duas variações do clima temperado. A primeira caracteriza-se por invernos com elevada pluviosidade e verões secos (Csa), enquanto a segunda também apresenta invernos chuvosos, porém com verões menos quentes e igualmente mais secos (Csb) (Köppen, 1936). Dessa forma, o clima de Bragança é classificado como Csb, clima temperado, caracterizado por verões quentes e secos, invernos chuvosos e temperaturas amenas e frias.

A região apresenta grande variação térmica ao longo do ano, com temperaturas baixas na maior parte do tempo e picos de calor no verão, em que as temperaturas podem

exceder os níveis ideais de conforto. A precipitação é mais intensa no inverno e reduz nos meses quentes. Os ventos predominam do oeste e noroeste, exceto de novembro a fevereiro, quando sopram do Sul, sendo mais intensos entre fevereiro e maio (Gonçalves, 2014).

De acordo com as normais climatológicas para o período 1991–2020, calculadas pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), a cidade de Bragança apresenta uma temperatura média anual em torno de 11,5 °C, com variação mensal típica entre cerca de 5°C em janeiro, mês mais frio, e 22–23 °C em julho, mês mais quente. A precipitação média anual situa-se em cerca de 900 a 920 mm, distribuída de forma desigual ao longo do ano, sendo mais intensa nos meses de outubro a março e significativamente menor no verão (IPMA, 1991–2020). Estes valores confirmam a classificação do clima local como Csb (Mediterrânico de verão seco e inverno mais húmido), e a grande variabilidade térmica anual observada em Bragança.

3.3 MEDIÇÕES DE DADOS E MONITORIZAÇÃO CLIMÁTICA

Com as informações obtidas por meio da coleta de dados climáticos, foi possível dar início às modelações e simulações com o uso do software ENVI-met, para assim, monitorar o clima da região de estudo.

Para as medições de dados foram utilizadas estações micrometeorológicas. Assim, utilizou-se uma estação registradora de dados de microclima térmico – Datalogger, Delta Ohm 32.1 (Figura 6) e três estações Delta Ohm 32.3 (Figura 6). As informações obtidas serviram tanto como ponto de partida quanto para validar o cenário, utilizando o software ENVI-met.

Os dataloggers são dispositivos projetados para registar e monitorizar variáveis associadas ao microclima térmico, sendo utilizados em estudos ambientais, tanto em ambientes de trabalho como em espaços exteriores. Estes equipamentos permitem a configuração de diferentes modos de medição, os quais definem o conjunto de sensores ativados, os parâmetros registados e os índices calculados, de acordo com o objetivo da análise.

Entre esses modos de medição incluem-se a avaliação de condições microclimáticas, a análise de conforto e a medição de parâmetros físicos ambientais. Para tal, são registadas variáveis como a Umidade Relativa (HR), a Temperatura do Ar (Ta), a Temperatura Radiante Média (Tmr), a Temperatura de Globo (Tg), a Temperatura de Bulbo Úmido (Tw) e a Velocidade do Ar (Va), a partir das quais podem ser calculados índices como o WBGT (Wet

Bulb Globe Temperature — Temperatura de Bulbo Úmido e Globo), o Índice de Sensação Térmica (WCI), o Voto Médio Estimado (PMV), o Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPD) e o isolamento térmico requerido para vestimentas (IREQ), entre outros.

A principal diferença entre os modelos está no número de entradas para sondas com módulo SICRAM: o modelo Delta Ohm 32.1 possui oito entradas, enquanto o Delta Ohm 32.3 conta com três. Além disso, o primeiro segue as normas ISO7726, ISO7730, ISO7243, ISO7933, ISO11079 e ISO8996, enquanto o segundo adota as normas ISO7243, ISO8996, ISO7726 e ISO7730. O intervalo de medição pode ser configurado pelo usuário em diferentes períodos, como a cada minuto ou hora, conforme a necessidade. Os dados coletados são armazenados no equipamento e, posteriormente, transferidos para um computador para análise.



Figura 6: Estação Datalogger, Delta Ohm 32.1 (esquerda) e estação Delta Ohm 32.3 (direita)

3.3.1 Período de medições

Os dados foram coletados ao longo de dois dias distintos na Praça José Adriano, no campus do IPB. Na primeira campanha, realizou-se uma coleta durante o período frio (inverno), enquanto a segunda campanha, a coleta ocorreu em período mais quente (verão), totalizando dois dias de medições para a pesquisa.

A primeira medição foi realizada em 16 de janeiro de 2025, ao longo de todo o dia, começando ao nascer do sol e encerrando ao pôr do sol. Para garantir condições ideais para a coleta, era fundamental um dia ensolarado, sem previsão de chuva ou presença de nuvens, o que exigia um monitoramento prévio das condições climáticas pelo IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera). Para a segunda coleta de dados, repetiu-se o procedimento no dia 26 de junho de 2025.

Para este local, foram selecionados quatro pontos de coleta. Esses pontos foram distribuídos pela área da seguinte forma: um ao norte da praça, identificado como ponto 1; um no centro da praça, identificado como ponto 2; outro ponto a leste, identificado como ponto 3; e um mais a sudoeste, identificado como ponto 4 (Figura 7). Os dados foram registrados a cada 2 minutos, sendo posteriormente compilados em laboratório e analisados.



Figura 7: Pontos de medição na Praça José Adriano (IPB)

3.4 MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS ESPACIAIS

Com a finalidade de fornecer dados espaciais para a modelação e simulação no ENVI-met, foram realizados levantamentos das dimensões dos edifícios, da vegetação presente nas áreas de estudo e das superfícies destes locais.

3.4.1 Dimensionamento dos edifícios

Para analisar o comportamento das edificações na área de estudo, foi utilizado um medidor de distância a laser (LB 500 STABILA). O dispositivo foi fixado em um tripé equipado com um nível, o que garante maior precisão nas medições e minimiza erros decorrentes de irregularidades no terreno (Figura 8). O processo de medição ocorre em três etapas para cada ponto: primeiro, registra-se a distância até o ponto de contato com o solo na direção estabelecida; depois, mantendo o equipamento na mesma posição, realiza-se uma medição horizontal nivelada ao prumo; por último, mede-se a distância até o topo da construção. Ao final, o próprio aparelho calcula automaticamente a altura, com base nessas três medições, e os dados obtidos são registrados e organizados para a continuidade da pesquisa.



Figura 8: Medidor de distância a laser (LB 500 STABILA)

3.4.2 Levantamento dos dados das árvores

O software ENVI-met permite a inserção de informações sobre a vegetação na modelagem de cenários, o que ajuda a obter resultados mais precisos quanto à dinâmica climática da região. Dessa forma, utilizou-se o medidor a laser (LB 500 STABILA) para determinar a altura das árvores presentes nos locais de pesquisa.

A Praça José Adriano (IPB), primeiro ponto de coleta de dados, possui 14 árvores, cujas espécies foram identificadas com o auxílio do aplicativo PlantNet e da investigadora Nihan Parlak. Entre elas, destacam-se uma *Chamaecyparis lawsoniana*, uma *Pseudotsuga menziesii*, uma *Trachycarpus fortunei*, uma *Platycladus orientalis*, sete exemplares de *Platanus occidentalis*, uma *Ligustrum lucidum* e duas *Prunus avium*.

3.4.3 Classificação do tipo de solo e superfície

Para inserir o tipo de solo no software ENVI-met, foram capturadas fotografias da superfície, permitindo a comparação e avaliação com os modelos de solo disponíveis no programa. Para a modelagem e simulação, foram analisados aspectos como textura, formato e rugosidade, que auxiliou na classificação.

A maior parte do solo da Praça José Adriano (IPB) é coberta por uma superfície empedrada, porém, há pequenas áreas de relva, onde estão localizadas as 14 árvores citadas neste estudo.

3.5 INQUÉRITOS

Para avaliar a percepção do conforto térmico local entre os frequentadores da área de estudo no dia da coleta de dados, aplicou-se um questionário previamente aprovado pela Comissão de Ética do IPB. O questionário incluía perguntas sobre a vestimenta, idade, altura, peso, gênero, país de origem, nível de atividade e horário da última refeição. Inicialmente, os participantes foram abordados e informados sobre os objetivos da pesquisa e sobre a aplicação dos questionários.

No primeiro dia de coleta, realizado na Praça José Adriano (IPB), foram aplicados 89 questionários ao longo de todo o período de medição dos dados e as perguntas foram realizadas próximas aos locais de medição, considerando o ponto do equipamento mais

próximo em que os participantes se encontravam ao responderem o questionário. No segundo dia de coleta de dados, 26 de junho de 2025, foram aplicados 110 questionários.

Nos estudos sobre conforto térmico, o Nível de Vestuário (clo) quantifica o isolamento térmico proporcionado pela roupa, refletindo sua capacidade de reter calor. Assim, para avaliar a percepção do ambiente térmico, os participantes foram questionados sobre três aspectos principais: sensação térmica, circulação do ar e umidade. Cada um desses fatores possuía uma escala específica de resposta, conforme apresentado na Tabela 1.

O questionário também apresentou questões sobre incomodidade térmica, com a possibilidade de selecionar mais de um fator, nível de atividade da pessoa no momento anterior à pesquisa e campos para adicionar o tipo de vestimenta da pessoa entrevistada. Essas perguntas tiveram como objetivo analisar o impacto das variações de temperatura do ar, da umidade relativa e velocidade do vento sobre as pessoas ao longo do dia.

Tabela 1: Questões para a avaliação sobre a percepção do conforto térmico

Avaliação do Conforto Térmico	Classificação
Sensação Térmica	(+3) Muito Quente (+2) Quente (+1) Temperado (0) Neutro (-1) Fresco (-2) Frio (-3) Muito Frio
Circulação do Ar	(+2) Muito Vento (+1) Vento Moderado (0) Bom (-1) Calmo (-2) Muito Calmo
Humidade	(+2) Muito Húmido (+1) Húmido (0) Razoavelmente Húmido (-1) Seco (-2) Muito Seco
Como gostaria de se sentir, neste momento, neste local?	(+3) Muito Mais Calor (+2) Mais Calor (+1) Um Pouco Mais de Calor (0) Como está Neste Momento (-1) Um Pouco Mais de Frio (-2) Mais Frio (-3) Muito Mais Frio

Fonte: Elaboração própria.

Para facilitar a análise e interpretação dos dados no software estatístico RStudio, as escalas do questionário, originalmente de -3 a 3, foram reclassificadas para um intervalo de 1 a 7. Essa adaptação permitiu identificar padrões de comportamento das variáveis, contribuindo para a avaliação do conforto térmico. O modelo do questionário está em anexo.

3.6 MODELAÇÕES E SIMULAÇÕES NO ENVI-MET

As modelagens e simulações deste estudo foram conduzidas utilizando o software ENVI-met, versão 5.7.2. A versão 5.7.2 do ENVI-met aprimorou a modelagem de microclimas urbanos com melhorias na simulação de fluxos radiativos, estabilidade da turbulência e no suporte a solos secos. Também reformulou o módulo de vegetação, otimizou a interação solo-raízes e introduziu a Análise de Conforto Térmico Dinâmico (dPET). Além disso, a interface gráfica foi redesenhada para maior usabilidade (ENVI-met, 2024).

Para um processamento eficiente dos dados, recomenda-se o uso de um computador com, no mínimo, 2 GB de RAM e um processador de 2GHz (ROSSETI, 2013) para o uso do ENVI-met. Além disso, é essencial que o processamento ocorra sem interrupções, evitando falhas decorrentes de falta de energia ou de instabilidade na conexão com a internet. O uso do software requer uma licença, disponibilizada pelo Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

A modelagem no software foi realizada na aplicação SPACES, na qual uma imagem de alta resolução foi inserida. A imagem, extraída do Google Earth, passou por ajustes nos parâmetros para garantir a correspondência com suas dimensões reais. Esse tratamento é essencial para assegurar a precisão do modelo, pois a equivalência de escala é necessária para que a área representada mantenha proporções corretas de altura e largura em relação aos pixels utilizados no processamento do software.

No ENVI-Met, o arquivo utilizado possui formato tridimensional, estruturado por uma grade (grid) que define o módulo da simulação. A área real representada, correspondente à Praça José Adriano (IPB), apresentava dimensões aproximadas de 90,2 metros por 81,2 metros. Para essa modelagem, foi adotada uma grade 3D com configuração de 88 x 93 x 30, utilizando valores aproximados de 1 para Dx, Dy e Dz. A fim de facilitar a representação, a imagem foi rotacionada em cerca de 30° diretamente no Google Earth, permitindo um melhor alinhamento das fachadas com os eixos Norte-Sul e Leste-Oeste e garantindo uma estrutura retangular mais coerente. Essa rotação foi posteriormente ajustada no software para manter a precisão da simulação. Para a representação da topografia, foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (DEM) com resolução espacial de 1 metro, integrado no ENVI-met para a definição das variações altimétricas do terreno na área de estudo. A altura foi determinada por meio do medidor de distância a laser (LB 500 STABILA).

Para iniciar a modelagem 3D, é necessário inserir os dados de entrada, incluindo alturas e materiais dos edifícios, tipos de vegetação, uso e ocupação do solo, além da topografia da área. Nesse estágio, também são integrados ao software os dados meteorológicos obtidos pelos equipamentos. Essas informações permitem que o programa

identifique e atribua corretamente cada elemento da imagem, possibilitando a construção do modelo tridimensional. Assim, foram fornecidos ao ENVI-met os dados de temperatura do ar (Ta), umidade relativa (HR) e velocidade do ar (Va).

3.6.1 Harmonização Espacial e Comparação de Cenários de Verão no ENVI-met

Para o verão, as simulações microclimáticas realizadas no ENVI-met utilizaram domínios com diferentes extensões espaciais. O primeiro cenário (real) foi simulado com um domínio de 88 × 93 grids, enquanto o segundo (alternativo) utilizou um domínio ampliado de 168 × 153 grids. Essa ampliação teve como objetivo a criação de uma zona de amortecimento (buffer) ao redor da área de interesse, visando à redução dos efeitos de borda, mantendo inalteradas a resolução espacial (dx, dy) e a posição relativa da área central analisada.

Embora o processador Leonardo (ENVI-met v5.7.2) permita a comparação automática entre cenários por meio de mapas de diferença, essa funcionalidade requer que os cenários tenham os mesmos domínios, com o mesmo número de grids e mesmo alinhamento espacial. A versão do software utilizada não apresenta ferramenta para o recorte espacial de domínios ou para a harmonização automática de áreas com extensões distintas, o que torna inviável a geração direta de mapas de diferença entre cenários de tamanhos distintos.

Diante disso, optou-se por realizar a comparação entre cenários por meio de pós-processamento externo dos dados, concentrando a análise exclusivamente na área central que coincide entre os domínios e que correspondente à área de interesse do estudo. Para isso, os resultados espaciais foram exportados do Leonardo em formato matricial (CSV), preservando a organização grid-a-grid das variáveis simuladas.

No caso do domínio ampliado (168 × 153 grids), foi extraída a subárea central correspondente ao domínio original de 88 × 93 grids, por meio da exclusão dos grids periféricos adicionados como buffer (40 grids em cada extremidade horizontal e 30 grids em cada extremidade vertical). Dessa forma, obteve-se duas matrizes espaciais com a mesma dimensão, mesmo alinhamento e com resolução equivalente, o que permitiu a comparação direta entre os cenários.

Os mapas de diferença foram então calculados por subtração matricial, utilizando o Excel, ponto a ponto entre os cenários, garantindo que cada célula representasse o mesmo grid físico em ambos os cenários. A visualização dos resultados foi realizada por meio de

mapas de calor (heatmaps), em que cada célula corresponde a um grid do ENVI-met, mantendo onexo espacial da análise. Após a formatação dos dados dentro do Excel, usou-se o Canva para finalizar a elaboração dos mapas de comparação do verão, com o intuito de os tornar o mais semelhantes possível aos mapas de comparação extraídos do ENVI-met no período de inverno. Ressalta-se que, para o período de inverno, não foi necessária a aplicação dessa abordagem, uma vez que os mapas de diferença puderam ser extraídos diretamente do ENVI-met, visto que os domínios de área eram equivalentes e não requereram ajustes adicionais para garantir a estabilidade da simulação.

Ao mesmo tempo em que este procedimento preserva a área de interesse para o estudo, também assegura a comparabilidade física e espacial entre os cenários. A abordagem adotada é metodologicamente válida, visto que é empregada em estudos que utilizam modelos microclimáticos com domínios de extensão diferenciada ou que presenciam limitações de pós-processamento interno.

3.7 CENÁRIOS DESENVOLVIDOS NO ENVI-MET

Após a inserção dos dados espaciais, foram desenvolvidos dois cenários: o cenário real (CR) e o cenário alternativo (CA). O cenário real representa a configuração atual da área estudada, mantendo suas características. Ele é utilizado tanto para a interpretação do microclima local quanto como referência para a validação do modelo. Já o cenário alternativo incorpora modificações consideradas necessárias para otimizar as condições microclimáticas da região, o que permite comparar os impactos das intervenções propostas.

3.7.1 Cenário real

Nesse cenário, a modelagem tridimensional tem como objetivo reproduzir com máxima fidelidade as características reais da área de estudo. Para isso, são incorporados elementos como o tipo de solo, a altura dos edifícios e as espécies de vegetação presentes no local, para a devida representação visual.

A representação da Praça José Adriano (IPB) utilizou o solo *Granit Pavement (single stones)* (GS) para áreas pavimentadas e algumas regiões menores eram cobertas por relva. No que se refere aos edifícios, suas alturas variaram entre 6 e 7 metros. Em relação à vegetação arbórea, foram identificadas sete espécies distintas, incluindo *Chamaecyparis lawsoniana*, *Pseudotsuga menziesii*, *Trachycarpus fortunei*, *Platycladus orientalis*, *Platanus*

occidentalis, *Ligustrum lucidum* e *Prunus avium*, que foram inseridas no software com as correspondências mais adequadas disponíveis na base de dados do sistema. A Figura 9 ilustra o modelo criado, que serviu de base para a execução das simulações.

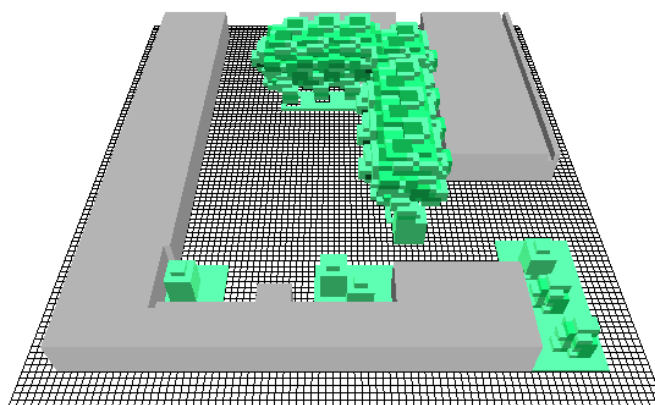


Figura 9: Cenário real da Praça José Adriano (IPB) modelado no ENVI-met

3.7.2 Cenário alternativo

Com base no primeiro cenário, foi proposta uma alternativa com base em Soluções Baseadas na Natureza para promover melhorias significativas no conforto térmico.

A área de estudo na Praça José Adriano (IPB) apresentou algumas limitações, como a predominância de superfícies impermeáveis e a necessidade de manter espaços livres de obstáculos devido à frequência de eventos acadêmicos no local. A alternativa por meio de Soluções Baseadas na Natureza para essa área (Figura 10), contou com a colaboração da investigadora Nihan Parlak, especialista em paisagismo, que desenhou uma proposta para o local.

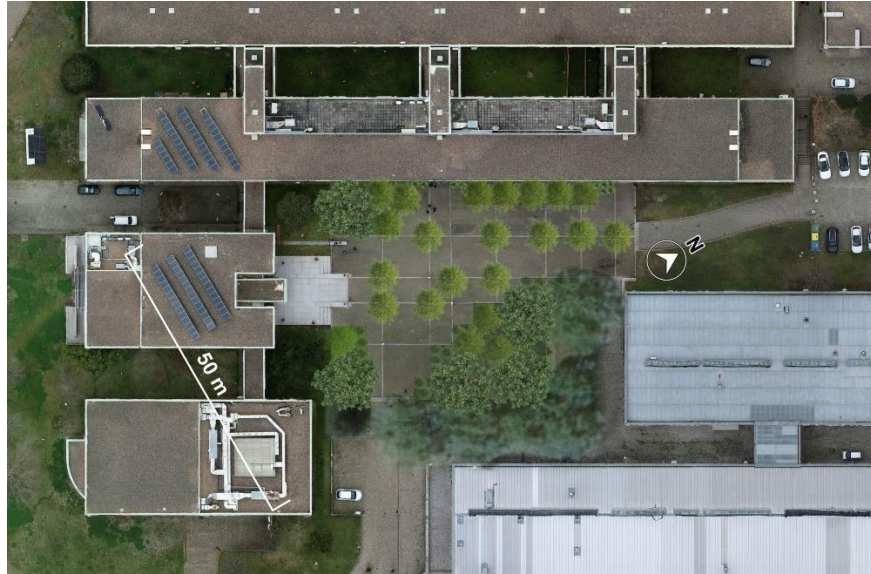


Figura 10: Proposta alternativa com a inclusão de vegetação adicional

Com a conclusão da modelação do cenário alternativo (Figura 11), iniciou-se o processo de simulação, com o objetivo de validar o modelo e aprimorar as análises de conforto térmico, evidenciando os benefícios da inclusão da vegetação adicional, uma forma de Solução Baseada na Natureza (SBN).

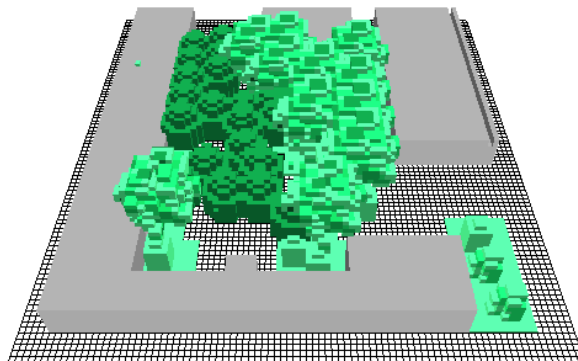


Figura 11: Cenário alternativo da Praça José Adriano (IPB) modelado no ENVI-met

3.8 MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Utilizando software estatístico (RStudio) e o Excel, os dados coletados nas medições e nos questionários aplicados foram processados. Essa ação resultou na geração de tabelas, gráficos, análises de correlação e mapas, contribuindo para uma interpretação mais clara dos resultados e a validação dos modelos desenvolvidos.

Foram aplicados diferentes testes estatísticos na análise dos dados. Previamente à aplicação do teste ANOVA, realizou-se o teste de normalidade para as variáveis Temperatura do Ar (T_a) e Temperatura Média Radiante (T_{mr}), de modo a verificar o cumprimento dos pressupostos necessários à utilização de testes paramétricos. Para avaliar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as médias de múltiplos grupos, utilizou-se o teste ANOVA, aplicado aos dados quantitativos recolhidos pelos equipamentos de medição, especificamente a essas variáveis. Considerou-se um nível de significância de 5%, sendo que valores de p inferiores a 0,05 ($p < 0,05$) indicam a presença de diferenças estatisticamente significativas entre as médias analisadas.

Adicionalmente, foi utilizada a correlação de Pearson para avaliar a relação entre a Temperatura do Ar (T_a) e a Temperatura Média Radiante (T_{mr}), tanto no período de inverno como no de verão, com base nos dados obtidos a partir das medições realizadas pelos equipamentos. A correlação de Pearson foi também aplicada para analisar a relação entre a Temperatura do Ar medida em campo e a Temperatura do Ar resultante das simulações, considerando separadamente os cenários de inverno e de verão, com o objetivo de avaliar o grau de concordância entre os dados observados e os dados simulados.

A correlação de Pearson é uma medida estatística utilizada para quantificar o grau de associação linear entre duas variáveis quantitativas. Representada pelo coeficiente r , esta medida assume valores entre -1 e $+1$, sendo que valores positivos indicam uma correlação direta e valores negativos indicam uma correlação inversa.

De acordo com a classificação proposta por Schober et al. (2018), a intensidade da correlação pode ser interpretada com base no valor absoluto de r , sendo classificada como negligenciável quando $|r| < 0,10$, fraca quando $0,10 \leq |r| \leq 0,39$, moderada quando $0,40 \leq |r| \leq 0,69$, forte entre $0,70$ e $0,89$, e muito forte para valores iguais ou superiores a $0,90$. Valores de r próximos de zero indicam ausência de correlação linear relevante entre as variáveis analisadas.

No caso dos dados provenientes dos inquéritos, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis, adequado à análise de variáveis ordinais e à comparação entre mais de

dois grupos independentes. A opção por um teste não paramétrico deveu-se à não verificação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias. O teste de Kruskal–Wallis foi aplicado para avaliar diferenças entre grupos de percepção subjetiva dos participantes em função das variáveis ambientais medidas. As variáveis de teste foram escolhidas com base na sua relação direta com cada tema analisado. Para a sensação térmica, foram consideradas variáveis ambientais e comportamentais que influenciam a percepção de conforto térmico. Já para a circulação do ar e a humidade, foram analisadas apenas as variáveis diretamente associadas a esses fenómenos. A adaptação foi avaliada através do vestuário, por representar uma resposta comportamental às condições térmicas percebidas.

Como os dados não seguem uma distribuição normal, o Kruskal–Wallis é o método mais adequado, por ser um método não-paramétrico, o que indica a não exigência de normalidade dos dados nem homogeneidade de variâncias. O teste foi realizado separadamente para as duas campanhas de coleta de dados, uma para o inverno, no dia 16 de janeiro de 2025, e outra para o verão no dia 26 de junho de 2025, possibilitando a comparação entre condições sazonais diferentes.

No teste de Kruskal-Wallis, para cada variável de agrupamento, um conjunto de variáveis meteorológicas e pessoais foi testado, verificando se há existência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos de respostas. Quando o valor de p for inferior a 0,05 ($p < 0.05$), pelo menos um grupo difere significativamente dos demais em relação à variável que foi testada. Esses resultados indicam que a percepção subjetiva dos participantes está associada a mudanças reais nas condições ambientais medidas. Por exemplo, quando a variável de agrupamento é “sensação térmica”, e há significância para temperatura do ar, temperatura radiante e humidade, isso indica que a percepção térmica dos indivíduos está diretamente associada às condições ambientais reais.

Os dados obtidos pelas estações de conforto térmico, incluindo temperatura do ar e temperatura média radiante, foram comparados e correlacionados com as previsões geradas pelo software ENVI-Met. Após as simulações, a ferramenta LEONARDO, uma extensão do ENVI-Met, foi utilizada para visualizar as variações de temperatura entre o cenário original e a alternativa proposta. Por fim, foram analisadas e comparadas as médias horárias das temperaturas ambientais e temperaturas médias radiantes entre o cenário atual e o novo cenário simulado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES DE ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS

A partir das medições realizadas, foi possível gerar gráficos que descrevem o comportamento climático da Praça José Adriano. As coletas ocorreram em diferentes estações do ano, permitindo uma validação parcial das simulações. Apesar das variações sazonais, o padrão geral manteve-se constante, com temperaturas mais baixas pela manhã, um pico após o início da tarde e uma diminuição no período noturno. Já a umidade relativa apresentou um comportamento inverso, com valores mais elevados nas primeiras horas do dia e redução à medida que a temperatura aumentava. Entre os pontos de medição, observaram-se algumas diferenças, principalmente nas temperaturas do ar e temperaturas médias radiantes, influenciadas pela variação da exposição solar ao longo do dia.

4.1.1 Temperatura do ar

A Figura 12 apresenta a variação da temperatura do ar ao longo do dia medida no período de inverno, conforme os dados obtidos pelas estações micrometeorológicas instaladas nos diferentes pontos de medição. Observa-se que as temperaturas mais baixas ocorreram no início da manhã, com um aumento gradual ao longo do dia e posterior redução no final da tarde.

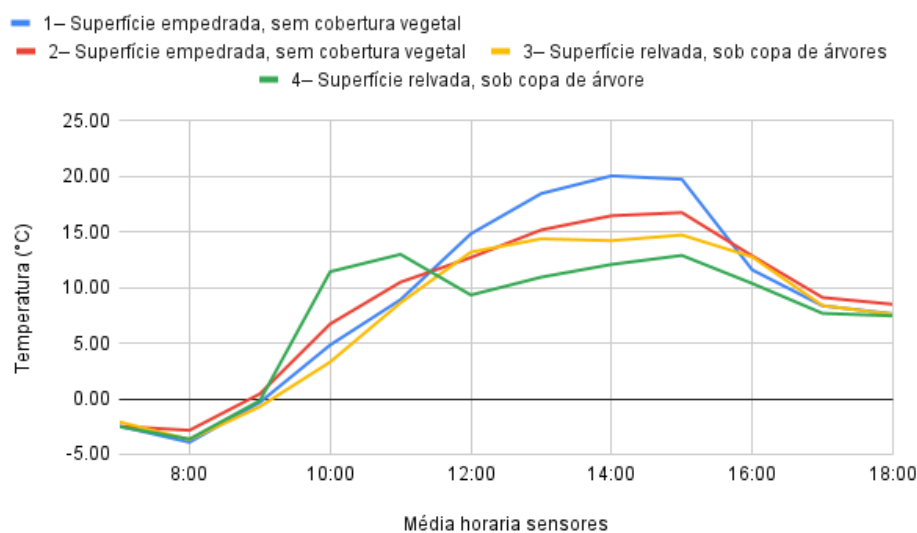


Figura 12: Variação da temperatura do ar ao longo do dia em 16 de janeiro de 2025

O comportamento térmico diário observado é coerente com os processos de aquecimento e resfriamento de superfícies radiantes descritos em estudos de microclima. Este padrão decorre da interação entre radiação solar, propriedades térmicas das superfícies, sombreamento e ventilação, em conformidade com os princípios da climatologia urbana (Oke, 1987).

A menor temperatura registada foi de $-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 8h, medida no ponto 1, enquanto a maior temperatura atingiu $20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 14h, também nesse ponto. Esse ponto permaneceu exposto à radiação solar direta durante a maior parte do dia, sem influência significativa de sombreamento por edificações, o que justifica os valores mais elevados de temperatura observados em alguns períodos do dia.

A ocorrência destes valores pode ser interpretada à luz das características geométricas do espaço urbano. Apesar de o ponto 1 se localizar próximo a edificações, apresentando um fator de visão do céu (FVC) inferior ao do ponto 2, a sua exposição direta à radiação solar durante parte significativa do período diurno contribuiu para o aquecimento do ar e da superfície envolvente.

Por outro lado, o ponto 2, situado numa área mais central da praça, apresenta provavelmente um FVC mais elevado, associado a uma maior abertura do espaço e menor obstrução por edifícios, o que favorece uma maior incidência de radiação solar ao longo do dia. No caso do ponto 1, a proximidade às edificações pode também intensificar as perdas radiativas durante as primeiras horas da manhã, explicando os valores mínimos de temperatura observados nesse período.

Por volta das 11h, observa-se uma redução na temperatura registrada no ponto 4. Tal comportamento pode ser atribuído à sombra projetada pelos edifícios após esse horário, bem como à presença de superfície de relva, que contribui para menores temperaturas devido à evapotranspiração e à menor absorção de calor em comparação às superfícies pavimentadas.

Durante o período da manhã, especialmente por volta das 9h, verificou-se a maior variação entre as temperaturas registradas nos diferentes pontos, associada ao início do aquecimento das superfícies e à heterogeneidade das condições de sombreamento entre as áreas analisadas. Após as 15h, nota-se uma tendência de redução da temperatura do ar em todos os pontos de estudo, acompanhando o decréscimo da radiação solar.

O teste de ANOVA foi aplicado após a verificação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias. Para os dados da temperatura do ar no período de inverno,

obteve-se $p = 0,0046$, indicando a existência de diferença estatisticamente significativa entre pelo menos dois dos pontos de monitoramento. Este resultado sugere que, apesar das elevadas correlações observadas entre as séries temporais, os valores médios de temperatura do ar não são completamente uniformes entre as áreas analisadas, refletindo a influência de características locais do ambiente sobre os níveis térmicos médios.

A Figura 13 apresenta a variação da temperatura do ar ao longo do dia medida no período de verão. Assim como observado nos dados obtidos na coleta de inverno, as temperaturas mais baixas ocorreram nas primeiras horas da manhã, com aumento gradual ao longo do dia, atingindo o pico térmico por volta das 15h, seguido de redução progressiva no final da tarde.

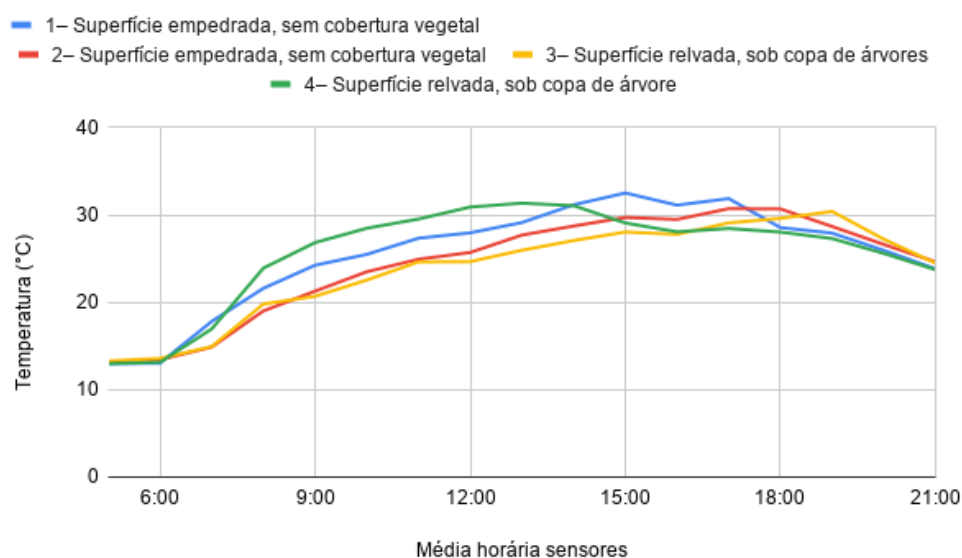


Figura 13: Variação da temperatura do ar ao longo do dia medida em 26 de junho de 2025

A menor temperatura registrada foi de $12,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 5h, enquanto a maior atingiu $32,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 15h, ambas medidas no ponto 1. O comportamento térmico diário é consistente com a dinâmica do balanço radiativo urbano, evidenciando um aumento progressivo da temperatura do ar após o nascer do sol, a partir das 6h. Embora a radiação solar incidente atinja o seu valor máximo por volta do meio-dia solar, a temperatura do ar continua a aumentar durante as horas seguintes, devido à acumulação de calor pelas superfícies urbanas e à sua liberação gradual para a atmosfera, refletindo a inércia térmica dos materiais. Este processo explica a ocorrência dos valores máximos de temperatura no início da tarde, e não no período de máxima insolação.

O ponto 4 apresentou uma temperatura do ar mais baixa em comparação com os demais pontos por volta das 14h, fenômeno que pode ser explicado pela sombra projetada pelas árvores que incidem sobre o local durante a maior parte da tarde, além da presença de relva, que tende a reduzir a absorção de calor e favorecer o resfriamento superficial.

A presença de sombras projetadas por elementos construídos ou vegetação e a condição de superfícies vegetadas, como a relva, manifestaram-se como bons mecanismos de moderação térmica local, especialmente nos horários de insolação intensa, alinhando-se com estudos que indicam o papel da vegetação no alívio térmico urbano (Minella et al., 2012).

As menores Temperaturas do Ar (T_a) foram registradas no ponto 3, também localizado próximo à vegetação e sobre superfície de relva, o que reforça a influência positiva da vegetação no microclima local.

Vale destacar que os pontos de medição que registraram os valores máximos e mínimos de temperatura do ar foram os mesmos para ambas as estações, evidenciando a consistência espacial das condições microclimáticas.

O teste de ANOVA aplicado aos dados da temperatura do ar no período de verão apresentou valor de $p = 0,00039$, indicando a existência de diferenças estatisticamente significativas entre pelo menos dois dos pontos de monitoramento. Este resultado sugere que, durante o verão, as características locais do ambiente, como o tipo de superfície e a presença ou ausência de vegetação, exercem influência nos valores médios de temperatura do ar.

4.1.2 Temperatura Média Radiante

A Temperatura Média Radiante representa a média das temperaturas das superfícies ao redor dos pontos analisados, responsáveis pelas trocas de calor por meio de radiação ou condução, que se mostra uma importante análise a ser feito neste contexto de conforto térmico e microclima urbano.

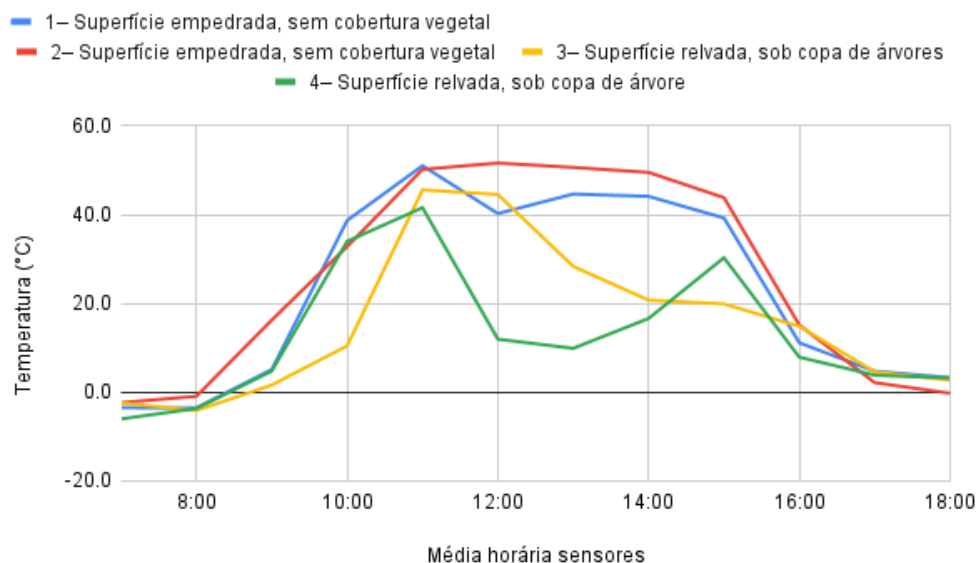


Figura 14: Variação da temperatura média radiante ao longo do dia medida em 16 de janeiro de 2025

Para os dados de temperatura média radiante (TMR) coletados no período de inverno, o teste ANOVA apresentou valor de $p < 0,001$, indicando a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os pontos de monitoramento.

O menor valor medido foi de $-4,1\text{ °C}$ às 8h, no ponto 3, enquanto o valor máximo foi $51,6\text{ °C}$ às 12h, registrado no ponto 2, localizado no centro da praça.

Ao analisar a figura 14, o ponto 2, situado numa área aberta sem sombreamento e sob exposição solar, apresentou o comportamento mais esperado, com ascensão na manhã, estabilização no máximo térmico e queda ao entardecer. Já os demais pontos (1, 3 e 4) distinguiram-se por uma queda na temperatura média radiante já a partir das 11h, devido ao sombreamento causado por edificações, e, após as 12h, o ponto 1 apresentou nova elevação, enquanto 3 e 4 continuaram decaindo até aproximadamente 14h. Essa divergência pode ser atribuída à presença de relva nos pontos 3 e 4 e à influência dos edifícios do entorno, que geram sombra e reduzem o ganho radiativo. Após as 16h, todos os pontos estudados sofreram queda na temperatura média radiante, conforme esperado pela redução da intensidade solar.

Essa dinâmica de aquecimento e esfriamento é consistente com os padrões observados em estudos de microclima urbano, nos quais a radiação solar direta e a geometria urbana influenciam fortemente o perfil térmico, como demonstrado em pesquisas

sobre conforto térmico em espaços abertos (Santos, 2024; Rossi, Krüger & Guimarães, 2013).

Para os dados de temperatura média radiante coletados no período de verão, o teste ANOVA apresentou valor de $p < 0,001$, evidenciando diferenças estatisticamente significativas acentuadas entre os pontos de monitoramento. Este resultado confirma que, durante o verão, o comportamento radiativo dos diferentes locais é mais heterogêneo, refletindo a influência das características locais do ambiente.

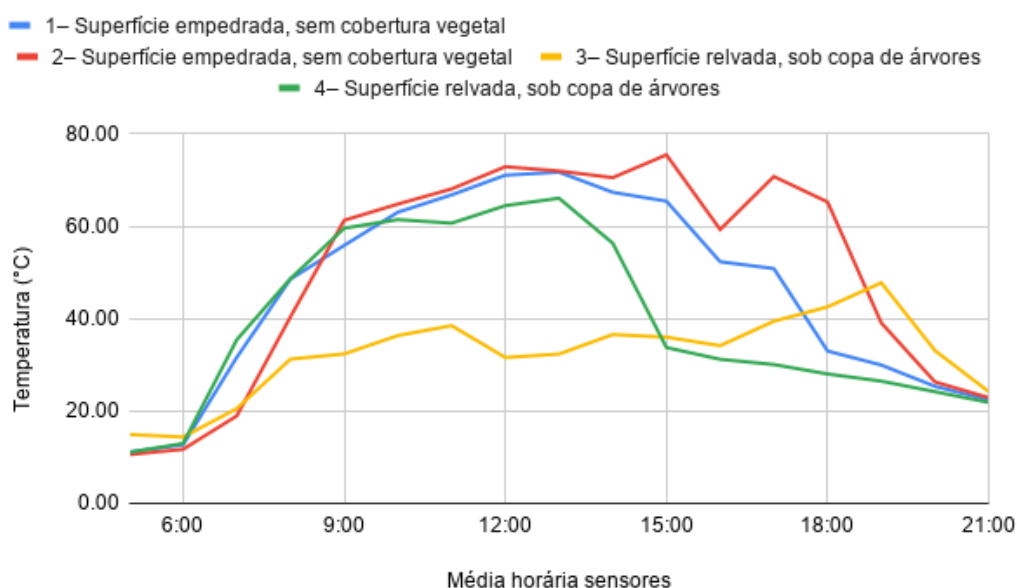


Figura 15: variação da temperatura média radiante ao longo do dia medida em 26 de junho de 2025

Ao observar as curvas, durante a manhã todos os sensores registraram uma elevação gradativa das temperaturas médias radiantes até por volta das 9h, seguida por uma estabilização até cerca das 12h. No intervalo entre 12h e 18h, o comportamento divergiu entre os pontos, em que alguns apresentaram quedas, outros apresentaram aumento ou mesmo estabilidade. Este padrão variado pode ser influenciado pela presença pontual de nuvens na parte da tarde, principalmente entre as 16h e as 17h, que momentaneamente reduziram o ganho radiativo. Após as 19h, todos os pontos registraram diminuição nas temperaturas médias radiantes, em decorrência do fim da incidência solar direta.

No período de inverno, a influência da vegetação é menos expressiva, uma vez que grande parte das árvores apresenta comportamento caducifólio, reduzindo o efeito de sombreamento e permitindo uma maior incidência de radiação solar direta. Em contraste, no período de verão, a vegetação desempenha um papel determinante na moderação térmica,

devido à presença de copas densas e folhosas, que promovem o sombreamento e reduzem o ganho radiativo, contribuindo para diferenças mais marcadas entre os pontos de medição.

O valor máximo observado foi 75,5°C no ponto 2 às 15h, enquanto o menor valor foi 10,6°C também no ponto 2 às 5h.

Os menores valores de temperatura média radiante foram medidos no ponto 3, que ficou a maior parte do dia sob sombra de árvore e com vegetação no entorno, o que pode indicar a importância da vegetação e do sombreamento no controle térmico de microambientes urbanos.

No início do dia, o ponto 4 apresentou os valores mais elevados de Temperatura Média Radiante (T_{mr}), seguido pelos pontos 1, 2 e 3, indicando um aquecimento mais rápido nesse local. Este comportamento está associado a uma maior exposição à radiação solar direta nas primeiras horas do dia, resultante de uma menor influência de sombreamento por elementos construídos ou vegetação.

Ao final do dia, observou-se uma inversão do padrão, com os maiores valores de T_{mr} registrados no ponto 3, seguido pelos pontos 2, 1 e 4. Este comportamento pode ser explicado pela dinâmica de acumulação e liberação de energia radiativa ao longo do dia, associada às características locais de exposição solar. Apesar de o ponto 3 apresentar sombreamento durante parte do dia, a incidência de radiação direta e refletida durante o período da tarde contribuiu para a acumulação de calor, que foi progressivamente libertado nas horas finais da medição.

Os resultados observados demonstram que, em locais próximos, no mesmo espaço urbano, podem existir dinâmicas térmicas distintas, especialmente em condições de maior incidência de radiação ao longo do dia. Logo, para avaliação de conforto térmico urbano ou microclimática, é importante considerar a heterogeneidade espacial, e não assumir uniformidade térmica.

4.1.3 Humidade relativa e Velocidade do ar

A análise dos dados de humidade relativa (HR) evidencia um comportamento inverso em relação a temperatura do ar, tanto no período de inverno quanto no de verão. Essa relação inversamente proporcional pressupõe que, à medida que a temperatura diminui, os valores de humidade relativa tendem a aumentar, e vice-versa. Assim, nos períodos mais

frios do dia, observam-se níveis mais elevados de humidade, enquanto, nas horas mais quentes, ocorre uma redução significativa dessa variável.

Durante o inverno, esse comportamento foi evidente, com o maior valor de HR (86,08%) registrado às 8h no ponto 1, momento em que as temperaturas se apresentavam mais baixas. Por outro lado, o menor valor, 21,09%, foi observado às 14h no ponto 2, período de maior aquecimento superficial. Essa diferença pode não estar associada apenas à variação térmica ao longo do dia, mas também às características físicas do entorno de cada ponto de coleta.

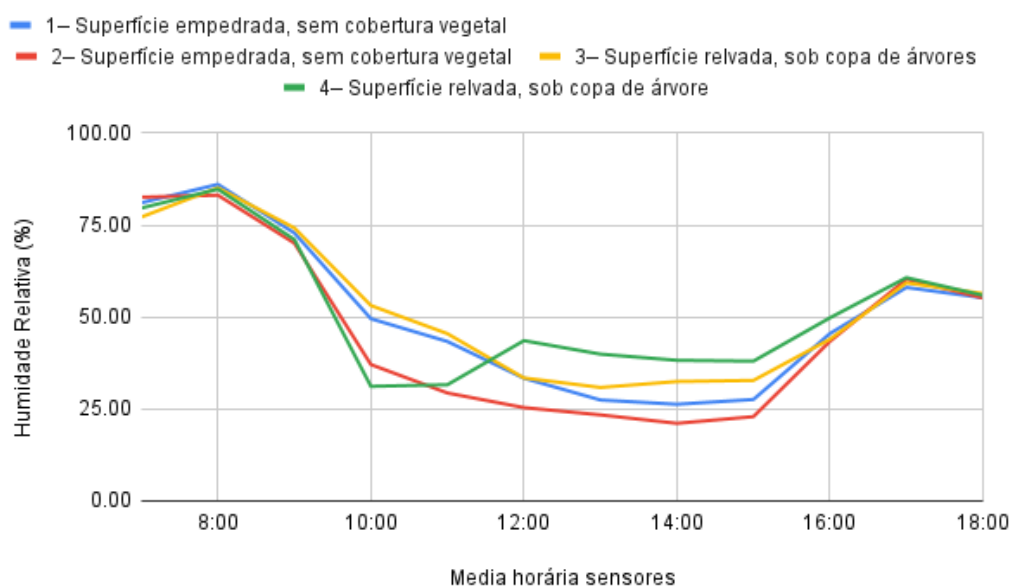


Figura 16: Variação da humidade relativa ao longo do dia medida em 16 de janeiro de 2025

Ao analisar as curvas, nota-se que o ponto 2, situado sobre superfície empedrada e mais afastado da vegetação, apresentou sistematicamente os menores índices de humidade, o que pode indicar forte relação entre a cobertura do solo e a presença de vegetação no microclima local. Já o ponto 1, instalado em área com superfície de relva e maior proximidade à vegetação, apresentou valores mais elevados de HR, evidenciando o papel da vegetação na retenção da humidade e na regulação do microambiente.

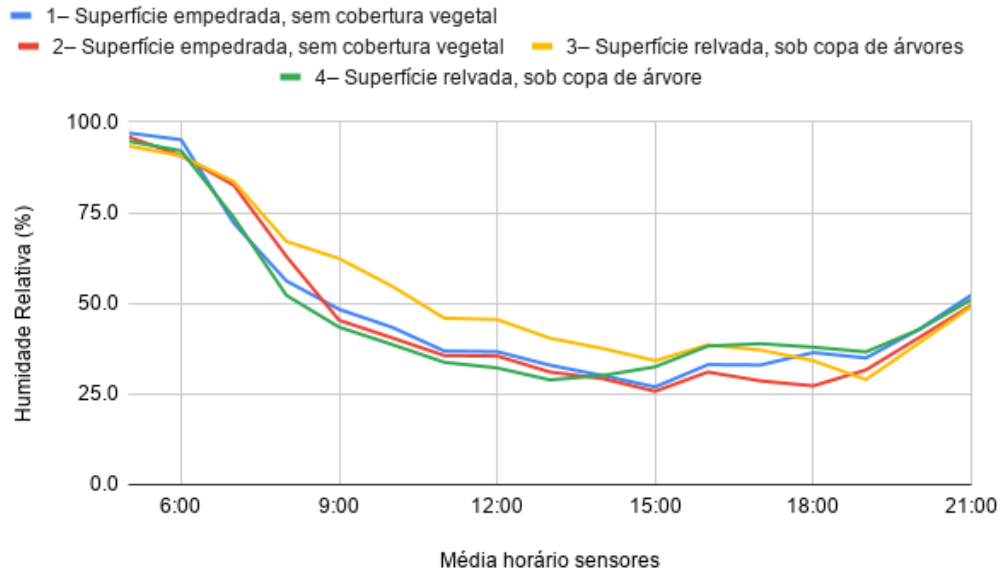


Figura 17: Variação da umidade relativa ao longo do dia medida em 26 de junho de 2025

Nos dados coletados no verão, o padrão geral manteve-se semelhante, embora com intensificação da amplitude diária, consequência direta das temperaturas mais elevadas e da maior incidência de radiação solar. Novamente, os maiores valores de HR, 86,08%, foram observados nas primeiras horas da manhã no ponto 3, e os menores, 21,09%, no ponto 2, no período da tarde. A diferença entre os pontos reforça a influência das condições de superfície e proximidade de vegetação sobre a umidade local, demonstrando que áreas mais permeáveis e sombreadas tendem a conservar melhor a umidade atmosférica, contribuindo para condições de conforto térmico mais favoráveis.

Em relação à velocidade do vento, os dados apontam um comportamento mais irregular e variável ao longo do dia, com máximos e mínimos registrados em diferentes horários em cada ponto de observação.

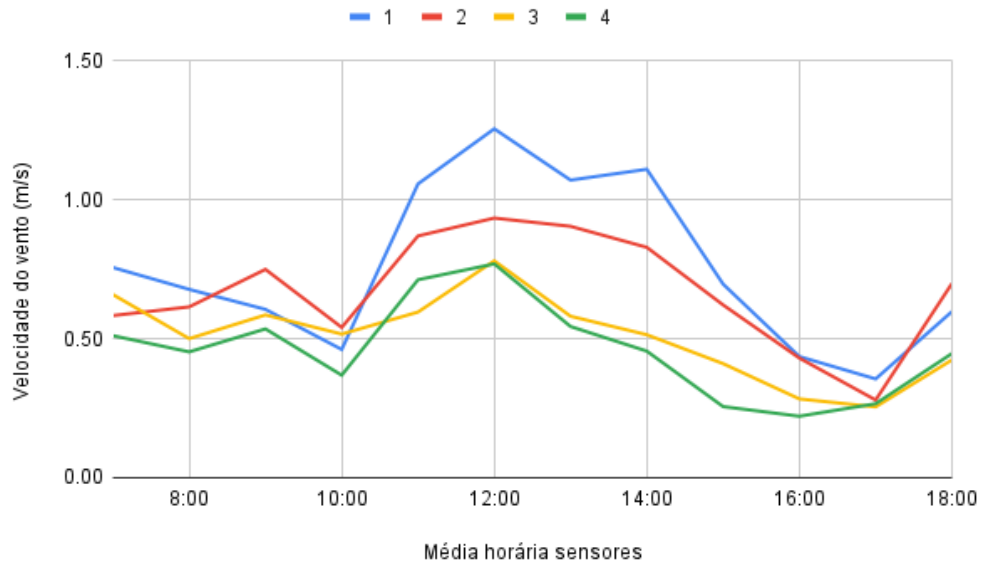


Figura 18: Variação da velocidade do vento ao longo do dia em 16 de janeiro de 2025

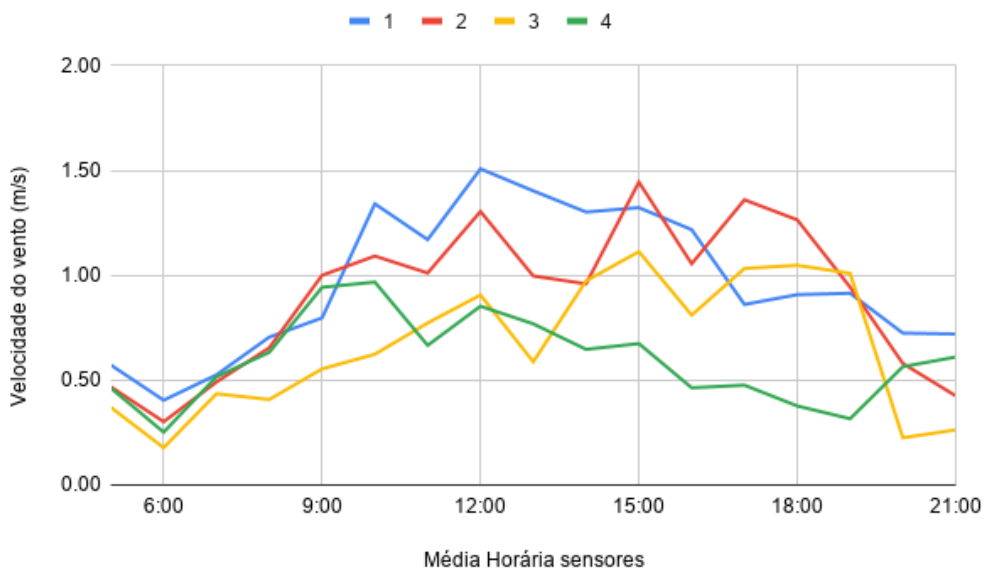


Figura 19: Variação da velocidade do vento ao longo do dia em 26 de junho de 2025

Essa oscilação reflete a influência de fatores locais, como a morfologia da envolvente, presença de barreiras físicas, como as edificações, e diferenças de aquecimento superficial, que modulam o fluxo do ar, assim como abordado por Yahia et al., 2017.

Dessa forma, percebe-se que áreas com maior cobertura vegetal e superfícies permeáveis mostram-se mais equilibradas em termos de umidade e ventilação, enquanto

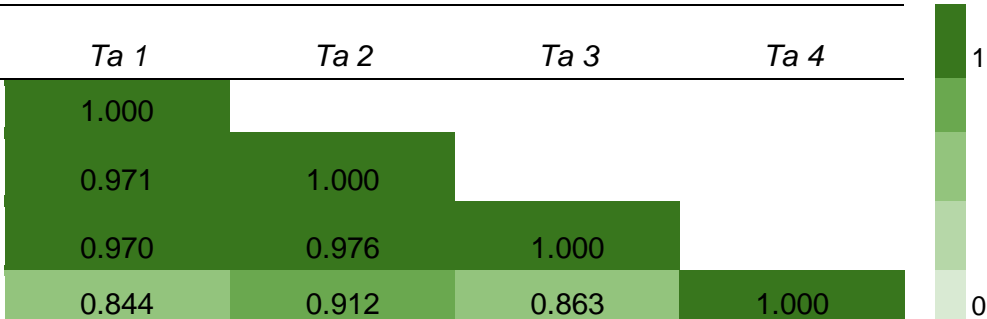
locais com revestimento impermeável apresentam variações menos favoráveis ao conforto térmico.

4.1.4 Correlação de dados para temperatura do ar e temperatura média radiante

No período de inverno, as correlações entre as temperaturas do ar (T_a) registradas pelos quatro pontos apresentaram valores elevados, em que $r > 0,8$, indicando coerência entre os pontos de medição. Essa consistência sugere uma distribuição térmica relativamente homogênea no ambiente, o que é típica de períodos com menor intensidade de radiação solar e maior estabilidade atmosférica.

Tabela 2: Correlação de Pearson entre os pontos para temperatura do ar no dia 16 de janeiro de 2025

	$T_a 1$	$T_a 2$	$T_a 3$	$T_a 4$
$T_a 1$	1.000			
$T_a 2$	0.971	1.000		
$T_a 3$	0.970	0.976	1.000	
$T_a 4$	0.844	0.912	0.863	1.000



Fonte: Elaboração própria.

Ao observar a tabela 2, nota-se que os pontos 1 e 2, ambos localizados em superfícies empedradas e afastados de áreas vegetadas, apresentam uma correlação muito forte ($r = 0,971$). Este resultado indica um comportamento térmico bastante semelhante entre estes locais, o que pode ser explicado pelas propriedades térmicas das superfícies. Já os pontos 3 e 4, situados sobre relva e próximos de áreas com vegetação, registam a correlação mais elevada do conjunto ($r = 0,976$). Apesar de os dados corresponderem ao período de inverno, no qual a vegetação arbórea se encontra maioritariamente sem folhas, a presença de relva continua a contribuir para uma maior homogeneidade térmica entre estes pontos, através da retenção de humidade e menor aquecimento superficial.

As correlações entre as temperaturas médias radiantes foram, de um modo geral, elevadas, indicando que, em condições de inverno e de menor ganho de radiação, a variabilidade espacial da TMR é reduzida. Destaca-se a correlação muito forte entre os pontos 1 e 2, ambos localizados sobre superfícies empedradas e afastados de vegetação,

com $r = 0,912$, evidenciando um comportamento radiativo bastante semelhante nesses ambientes.

Tabela 3: Correlação de Pearson entre os pontos para temperatura média radiante no dia 16 de janeiro de 2025

	Tmr 1	Tmr 2	Tmr 3	Tmr 4
Tmr 1	1.000			
Tmr 2	0.912	1.000		
Tmr 3	0.789	0.818	1.000	
Tmr 4	0.726	0.642	0.555	1.000

Fonte: Elaboração própria.

As correlações entre as temperaturas do ar (Ta) no período de verão foram, de modo geral, fortes a muito fortes, indicando elevada coerência temporal entre os pontos de medição. Destaca-se a correlação muito forte entre os pontos 1 e 2 (tabela 4), ambos localizados sobre superfícies empedradas e afastados de vegetação, com $r = 0,944$, refletindo um comportamento térmico semelhante associado às propriedades das superfícies.

Tabela 4: Correlação de Pearson entre os pontos para temperatura do ar no dia 26 de junho de 2025

	Ta 1	Ta 2	Ta 3	Ta 4
Ta 1	1.000			
Ta 2	0.944	1.000		
Ta 3	0.903	0.971	1.000	
Ta 4	0.906	0.846	0.812	1.000

Fonte: Elaboração própria.

Entre os pontos 3 e 4, situados sobre relva e próximos de áreas vegetadas, observou-se igualmente uma correlação forte ($r = 0,812$), sugerindo uma resposta térmica comparável nesses ambientes. As correlações entre pontos com características contrastantes mantiveram-se elevadas, como entre o ponto 3 (relva e vegetação) e o ponto 2 (empedrado),

com $r = 0,971$, indicando que, apesar das diferenças de cobertura do solo, a temperatura do ar no verão é fortemente influenciada pelas condições atmosféricas regionais.

No entanto, as correlações entre as Tmr apresentaram comportamento mais heterogêneo. Destaca-se a correlação forte entre os pontos 1 e 2, localizados sobre superfícies empedradas e sem vegetação, com $r = 0,816$ (tabela 5), indicando comportamento radiativo semelhante. Em contraste, os pontos 3 e 4, situados sobre relva e próximos de vegetação, apresentaram correlação fraca ($r = 0,227$), refletindo maior heterogeneidade radiativa nesses ambientes, resultante de diferenças locais de sombreamento, exposição solar e geometria do espaço.

Tabela 5: Correlação de Pearson entre os pontos para temperatura média radiante no dia 26 de junho de 2025

	Tmr 1	Tmr 2	Tmr 3	Tmr 4
Tmr 1	1.000			
Tmr 2	0.816	1.000		
Tmr 3	0.383	0.579	1.000	
Tmr 4	0.799	0.604	0.227	1.000

Fonte: Elaboração própria.

Ao se analisar as duas estações, nota-se que a Ta apresentou correlações altas tanto no inverno quanto no verão, o que reforça sua estabilidade espacial e sua menor sensibilidade a fatores de microescala. Por outro lado, a Tmr apresentou um comportamento mais variável entre as estações, com maior homogeneidade no inverno e maior variação no verão.

Essa diferença sugere que a radiação solar direta pode ter um papel importante no balanço térmico do ambiente construído, especialmente nos períodos de maior insolação, quando a radiação incidente sobre superfícies expostas tende a se tornar um dos principais fatores associados ao aumento do desconforto térmico em áreas externas sem sombreamento adequado, como discutido na publicação de Watanabe e Horikoshi (2012).

Os resultados do teste ANOVA indicaram a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os pontos de medição para a temperatura do ar (Ta), tanto no inverno quanto no verão, bem como para a temperatura média radiante (TMR) em ambas as estações. Estes resultados indicam que, embora as variáveis térmicas apresentem variações

semelhantes ao longo do tempo nos diferentes pontos de medição, os níveis médios de temperatura do ar e de temperatura média radiante diferem entre os locais, evidenciando a influência das características locais do ambiente, como o tipo de superfície e a presença ou ausência de vegetação, em ambos os contextos sazonais.

As elevadas correlações de Pearson observadas entre os pontos de medição indicam que as variáveis térmicas apresentam comportamento temporal semelhante, variando de forma sincronizada ao longo do tempo. No entanto, os resultados da ANOVA demonstram que essa coerência temporal não implica igualdade nos valores médios, evidenciando a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os pontos, associadas às características locais do ambiente.

4.1 ANÁLISE DOS QUESTIONÁRIOS

Durante os dias de medições meteorológicas, foram aplicados questionários em simultâneo. No período do inverno foram aplicados 89 questionários e no período do verão, 110 questionários, totalizando a participação de 125 homens e 73 mulheres durante os dois períodos. Os países de origem dos participantes foram diversos, incluindo Brasil, Portugal, Cabo Verde, São Tomé e Príncipe, Espanha, Angola, Tunísia, Turquia, Moçambique, dentre outros, sendo que a maioria dos participantes tem nacionalidade portuguesa e brasileira. Quanto ao nível de atividade, a maioria dos participantes encontrava-se na categoria caminhada (MET = 1,5), possivelmente porque os questionários foram aplicados em uma praça no IPB, espaço de acesso ou saída de edifícios.

4.1.1 Análises estatísticas

A Tabela 6 apresenta as variáveis de agrupamento e de teste consideradas para a aplicação do teste de Kruskal–Wallis, servindo de base para a análise das diferenças estatisticamente significativas entre os grupos de respostas discutidas nesta seção.

Tabela 6: Variáveis de agrupamento e de teste para realização do teste de Kruskal–Wallis

Teste	Variável de Agrupamento	Variáveis de Teste
Teste 1	Sensação Térmica	Temperatura do Ar Percepção de temperatura do ar Humidade Relativa Velocidade do ar Temperatura Média Radiante
Teste 2	Circulação de Ar	Humidade Relativa Velocidade do ar Roupa (Clo)
Teste 3	Adaptação (Sensação Térmica)	Roupa (Clo)
Teste 4	Humidade	Humidade Relativa Velocidade do ar

Fonte: Elaboração própria.

Para o primeiro teste, com a variável de agrupamento sensação térmica, em 16 de janeiro de 2025, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis, uma vez que não se verificaram os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias. O teste revelou diferenças estatisticamente significativas na temperatura do ar, $H(6) = 23.74$, $p = 0.001$, na percepção da temperatura do ar, $H(6) = 27.55$, $p < 0.001$, e na humidade relativa, $H(6) = 19.13$, $p = 0.004$, em função dos níveis de sensação térmica. Por outro lado, a velocidade do ar não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, $H(6) = 9.88$, $p = 0.130$.

A análise do boxplot (Figura 20) evidenciou uma tendência de aumento da temperatura do ar à medida que a sensação térmica se tornava mais quente, com exceção dos níveis “frio – 2” e “muito quente – 7”, sendo este último representado por uma única observação. Estes resultados confirmam visualmente os dados obtidos no teste estatístico, indicando coerência entre as variáveis físicas e a resposta subjetiva dos ocupantes.

Já na análise do boxplot da figura 21, percebe-se um aumento progressivo da percepção da temperatura do ar à medida que os níveis de sensação térmica (AC1) se tornam mais elevados. Nos níveis mais baixos (1 e 2), observam-se valores inferiores e maior dispersão, enquanto nos níveis intermédios (3, 4 e 5) a percepção térmica aumenta de forma gradual. Nos níveis mais elevados (6 e 7), os valores são mais altos e menos dispersos,

sendo o nível “muito quente – 7” representado por uma única observação. Os resultados indicam coerência entre a sensação térmica reportada e a percepção subjetiva da temperatura do ar.

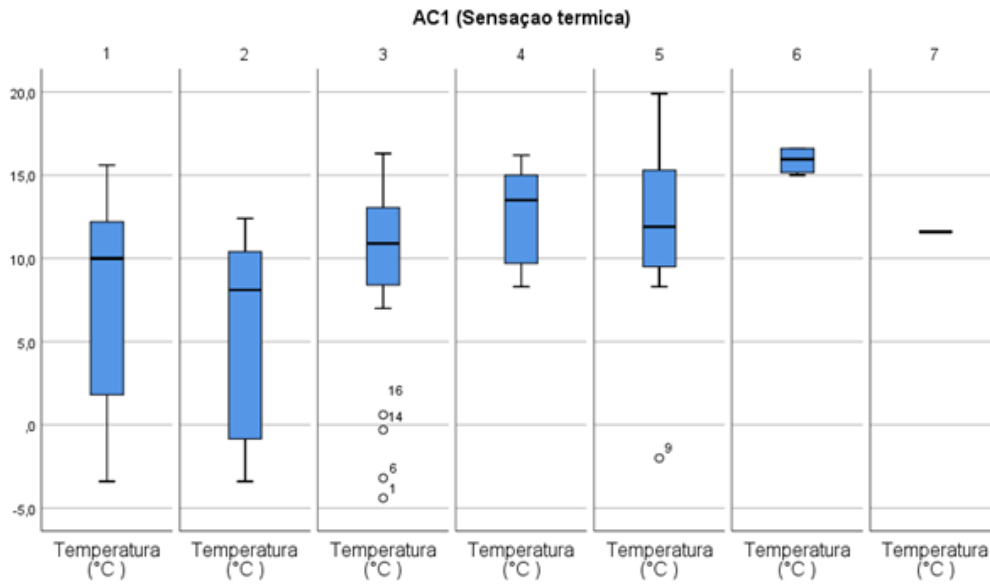


Figura 20: Variação da temperatura do ar segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 16 de janeiro de 2025.

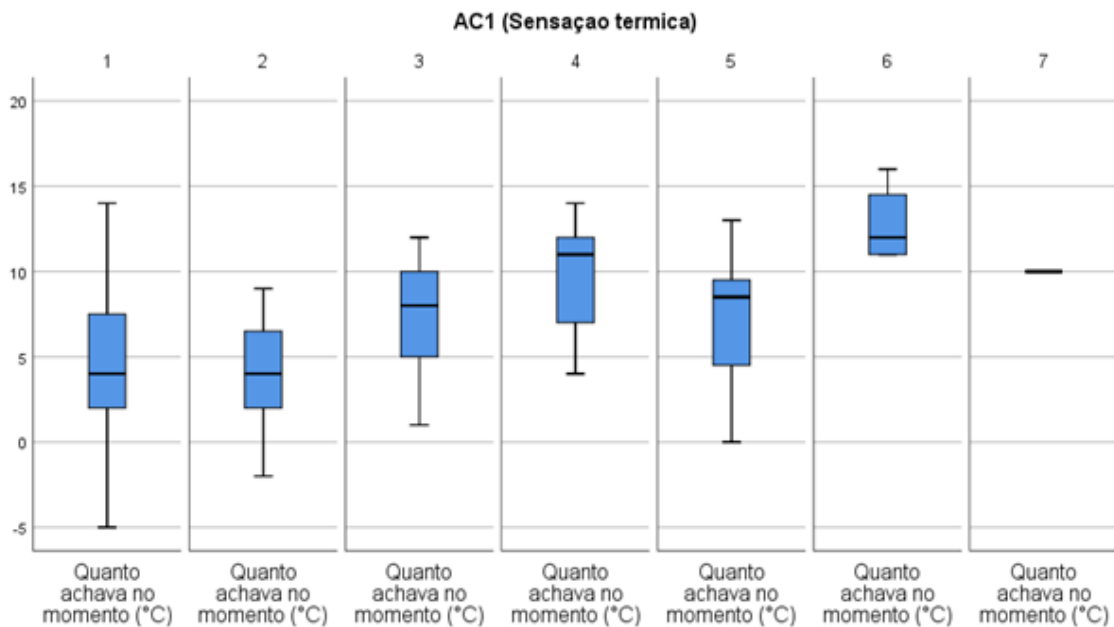


Figura 21: Variação da percepção da temperatura do ar segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 16 de janeiro de 2025.

No período de verão, em 26 de junho de 2025, observaram-se igualmente diferenças estatisticamente significativas na temperatura do ar, $H(5) = 13.86$, $p = 0.017$, na percepção da temperatura do ar, $H(5) = 35.45$, $p < 0.001$, e na humidade relativa, $H(5) = 17.79$, $p = 0.003$, em função da sensação térmica. Tal como no inverno, a velocidade do ar não apresentou diferenças estatisticamente significativas, $H(5) = 2.90$, $p = 0.716$.

A leitura dos boxplot da figura 22, confirma os resultados obtidos pelos testes estatísticos, evidenciando um aumento das temperaturas do ar nas classes de sensação térmica mais elevadas. Nos níveis intermédios, observa-se alguma variabilidade dos valores de temperatura, enquanto nos níveis mais elevados (6 e 7) as temperaturas apresentam valores superiores e menor dispersão. Os resultados indicam uma relação consistente entre a temperatura do ar e a sensação térmica reportada.

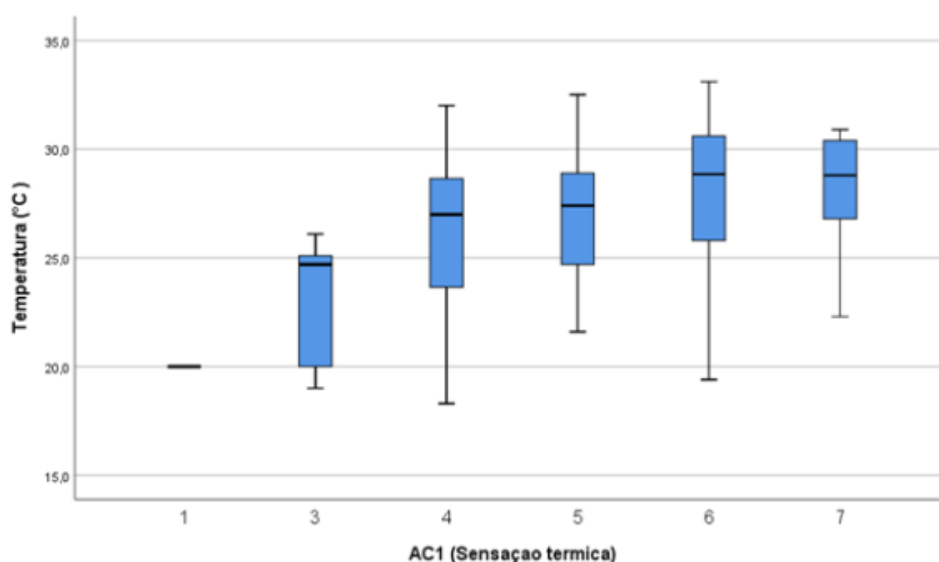


Figura 22: Variação da temperatura do ar segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 26 de junho de 2025.

No boxplot da figura 23, nota-se um aumento da temperatura média radiante à medida que os níveis de sensação térmica (AC1) se tornam mais elevados. Observa-se maior variabilidade nos níveis intermédios e valores mais elevados nos níveis 6 e 7, sugerindo uma associação positiva entre a temperatura média radiante e a sensação térmica percebida.

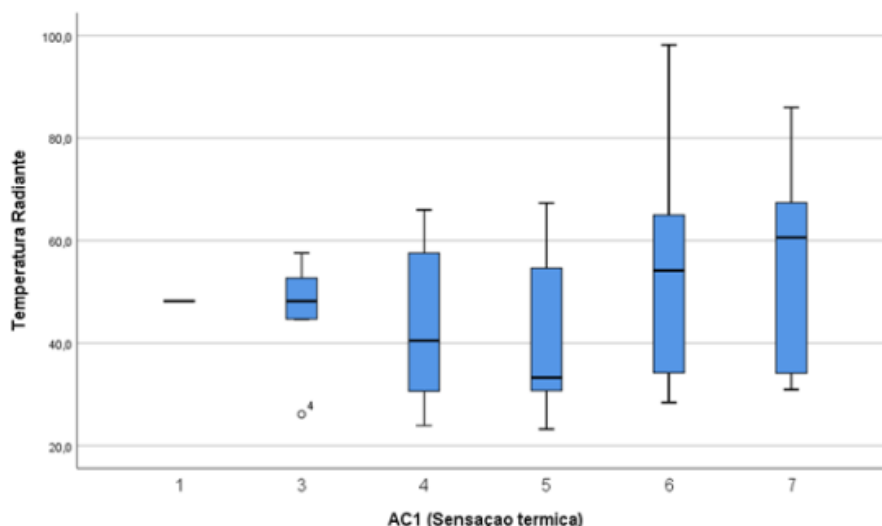


Figura 23: Variação da temperatura média radiante segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 26 de junho de 2025.

O Teste 1 de Kruskal–Wallis indicou que a sensação térmica está significativamente associada às condições ambientais em ambos os períodos analisados. No inverno, observaram-se diferenças estatisticamente significativas na temperatura do ar, na percepção da temperatura e na humidade relativa, indicando que os participantes respondem às condições térmicas do ambiente, em particular ao frio e ao teor de humidade do ar. No verão, estas mesmas variáveis mantiveram-se estatisticamente significativas, sugerindo que a sensação térmica continua a depender essencialmente da temperatura do ar percebida e das condições de humidade. De forma geral, em ambos os períodos, a velocidade do ar não apresentou diferenças estatisticamente significativas, enquanto a maior dispersão observada no verão sugere uma maior heterogeneidade das respostas térmicas em condições mais quentes.

No teste 2, relativo à circulação do ar, no período de inverno, o teste de Kruskal–Wallis indicou diferenças estatisticamente significativas na humidade relativa em função da percepção da circulação do ar, $H(4) = 11.11$, $p = 0.025$. No entanto, não se observaram diferenças estatisticamente significativas na velocidade do ar, $H(4) = 4.91$, $p = 0.297$. Por outro lado, no verão, o agrupamento Circulação do Ar apresentou diferenças significativas com a variável Roupa (Clo) ($H = 8.87$, $p = 0.0311$), indicando que a circulação do ar é percebida como um fator que pode influenciar as escolhas de vestuário, em que ambientes menos ventilados, tende se a optar por roupas mais leves, enquanto uma maior movimentação do ar permite algum aumento no isolamento sem agravar o desconforto pelo calor.

No terceiro teste, a adaptação comportamental foi analisada através do isolamento térmico do vestuário (Clo), considerando a sensação térmica como variável de agrupamento. No período de inverno, o teste de Kruskal–Wallis não revelou diferenças estatisticamente significativas nos valores de Clo em função da sensação térmica, $H(6) = 6.05$, $p = 0.418$. Em contraste, no período de verão, observaram-se diferenças estatisticamente significativas no isolamento térmico do vestuário em função da sensação térmica, $H(5) = 15.50$, $p = 0.008$.

Estes resultados indicam que, no período de inverno, a adaptação comportamental através do vestuário é limitada, não se verificando diferenças significativas no isolamento térmico em função da sensação térmica percebida. Em contraste, no verão, o isolamento térmico do vestuário varia significativamente entre as classes de sensação térmica, evidenciando o papel do vestuário como um mecanismo relevante de adaptação comportamental às condições térmicas, como se pode observar na figura 24.

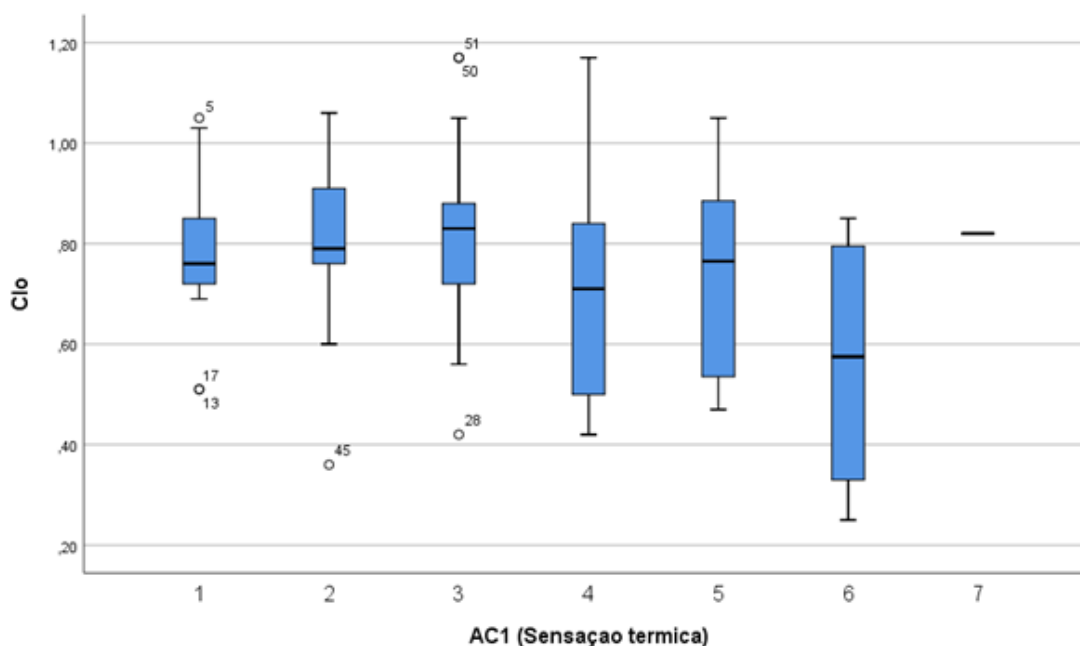


Figura 24: Variação do isolamento térmico do vestuário (Clo) segundo os níveis de sensação térmica (AC1) – 26 de junho de 2025.

Já no teste 4, os resultados do período de inverno revelaram diferenças estatisticamente significativas na humidade relativa em função dos níveis de percepção da humidade, $H(4) = 11.11$, $p = .025$, enquanto a velocidade do ar não apresentou diferenças estatisticamente significativas, $H(4) = 4.91$, $p = .297$. O boxplot (figura 25) mostra diferenças

nas medianas da humidade relativa entre os níveis de percepção da humidade, em concordância com o resultado estatisticamente significativo do teste de Kruskal–Wallis.

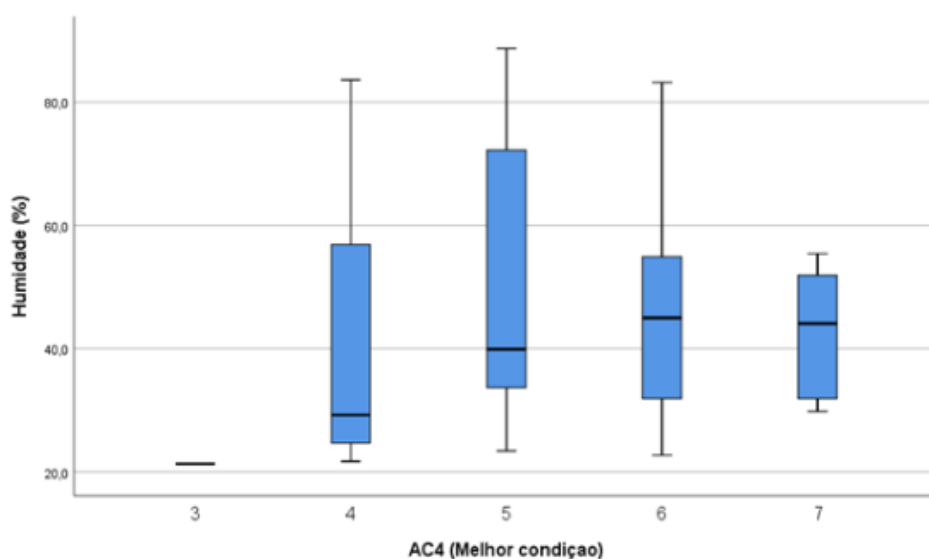


Figura 25: Variação da humidade relativa segundo os níveis de percepção da humidade (AC4) – 16 de janeiro de 2025.

Os resultados evidenciam uma forte coerência entre as condições térmicas medidas e as respostas subjetivas dos ocupantes, tanto no inverno como no verão. Valores mais elevados ou mais baixos de sensação térmica estão associados, respectivamente, a maiores ou menores temperaturas do ar, à percepção térmica e à humidade relativa.

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DESENVOLVIDAS NO ENVI-MET

Para se melhor interpretar as condições microclimáticas no contexto da Praça José Adriano (Praça da ESTIG), realizaram-se as simulações dos cenários criados por meio do software ENVI-met, utilizando os dados coletados nos dois dias de medições. Essas simulações fornecem estimativas das variáveis microclimáticas (Temperatura do Ar, Temperatura Média Radiante, Humidade Relativa e Velocidade do Ar) calculadas pelo modelo ENVI-met a partir da representação numérica das condições atmosféricas e das características físicas do ambiente para os dias em estudo. As simulações realizadas para o período de verão foram configuradas com o padrão de tempo UTC (Tempo Universal Coordenado), garantindo a consistência temporal entre todos os cenários analisados.

4.3.1 Análises para o cenário real simulado

Para a realização das simulações no ENVI-met, os dados de entrada foram definidos com base nas medições das estações micrometeorológicas. Utilizaram-se as médias das temperaturas máxima e mínima do ar, assim como os valores correspondentes de umidade relativa. Com esses parâmetros, a simulação é realizada com base na situação atual da Praça José Adriano, pois o software associa o comportamento do modelo às condições ambientais observadas em cada horário, gerando resultados para cada período do dia.

Na simulação para o dia 16 de janeiro de 2025, a menor temperatura do ar registrada no cenário real simulado foi de $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 8h, indicada no ponto 1, e a maior temperatura do ar foi de $16,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, registrada às 14h, indicada no mesmo ponto. Já na medição realizada no verão, em 26 de junho de 2025, a menor temperatura do ar registrada foi de $15,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ indicada no ponto 1 às 5h, e a maior temperatura do ar foi registrada às 15h, $31,49^{\circ}\text{C}$, também no ponto 1.

Acerca da Temperatura Média Radiante, o menor valor registrado na coleta de inverno foi de $-7,28^{\circ}\text{C}$, às 8h no ponto 1, e o maior valor registrado foi $46,72^{\circ}\text{C}$ às 14h no ponto 2. Por outro lado, na coleta de verão, o menor valor de Temperatura Média Radiante foi de $10,74^{\circ}\text{C}$ registrado às 5h no ponto 1, e o maior foi de $68,51^{\circ}\text{C}$, registrado às 15h, também no ponto 1.

A análise dos dados de Temperatura do Ar e de Temperatura Média Radiante revelou padrões similares entre os dias de estudo de inverno e verão, tendo sido observada a repetição dos extremos térmicos nos mesmos pontos analisados em diferentes dias. Apesar dessa semelhança, foi possível notar pequenas diferenças nos horários dos máximos e mínimos. Essa variação pode estar relacionada às características sazonais do período de coleta, especialmente devido às mudanças na rota solar ao longo do ano, que afetam diretamente as condições ambientais locais.

No dia da simulação para 16 de janeiro de 2025, a simulação indicou que, nas primeiras horas do dia, as temperaturas do ar mais elevadas se concentram nas áreas próximas aos edifícios. Isso ocorre porque essas estruturas liberam calor acumulado e reduzem a exposição direta ao céu noturno, minimizando a perda por radiação e funcionando como barreira contra o resfriamento rápido do ambiente aberto (Bonansea de Alencar Novaes & Monteiro, 2022).

Entretanto, na simulação do dia 26 de junho de 2025, observa-se o comportamento oposto: as áreas a céu aberto aquecem mais rapidamente pela manhã devido ao aumento da incidência direta da radiação solar, enquanto as proximidades dos edifícios tendem a permanecer mais frescas nesse período, especialmente por efeito do sombreamento projetado e da orientação dessas edificações em relação ao sol. Essa diferença entre as estações é fundamentada por estudos microclimáticos urbanos, que destacam que o padrão de distribuição térmica é sensível para o balanço radiativo e para o arranjo do tecido urbano, podendo se inverter conforme a estação e o horário simulados (Lago Lima, 2022; Bonansea de Alencar Novaes & Monteiro, 2022). Esse padrão pode ser observado nas imagens a seguir (Figuras 26,27,28 e 29).

Nos mapas gerados pelo ENVI-met, os quadrados pretos correspondem aos edifícios existentes na área de estudo. Os quadrados verdes representam elementos de vegetação arbórea visíveis no output gráfico do modelo. Importante salientar que estes elementos não correspondem à totalidade da vegetação inserida no modelo, mas apenas àquela que é explicitamente representada nas imagens geradas pelo software. Esta diferença reflete limitações associadas à forma como o ENVI-met visualiza determinados elementos vegetados, não comprometendo a inclusão da vegetação nos cálculos físicos da simulação.

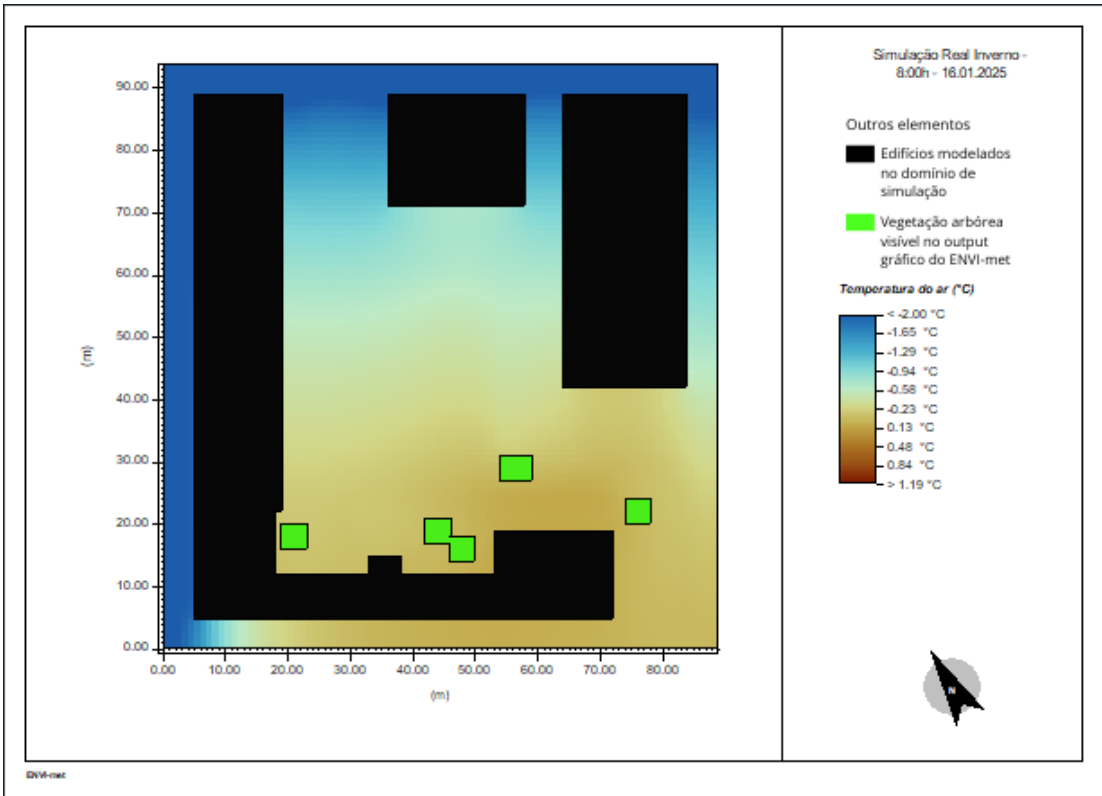


Figura 26: Mapa de resultados da simulação no ENVI-met para o cenário real no dia 16 de janeiro de 2025 (8:00h)

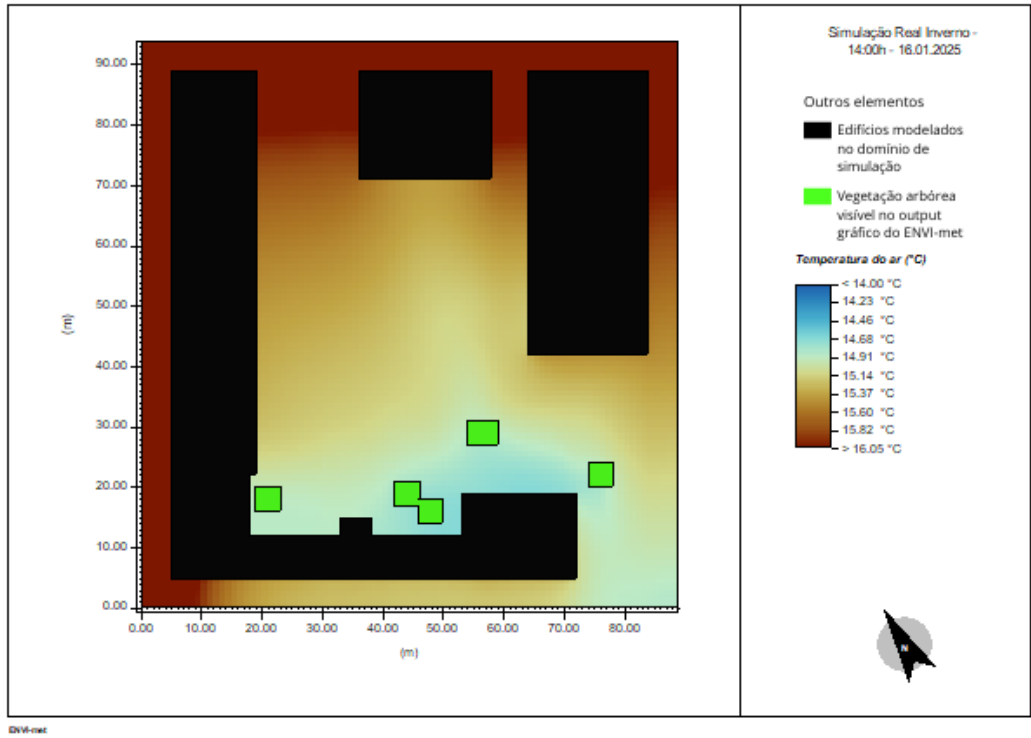


Figura 27: Mapa de resultados da simulação no ENVI-met para o cenário real no dia 16 de janeiro de 2025 (14:00h)

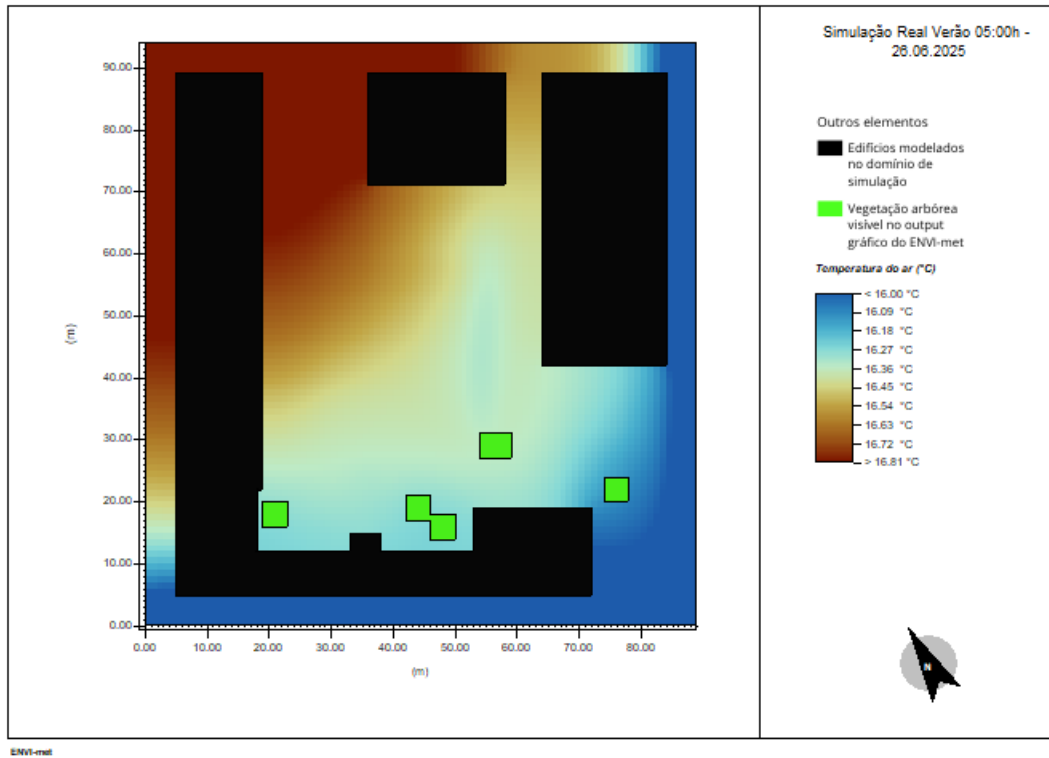


Figura 28: Mapa de resultados da simulação no ENVI-met para o cenário real em 26 de junho de 2025 (5:00h)

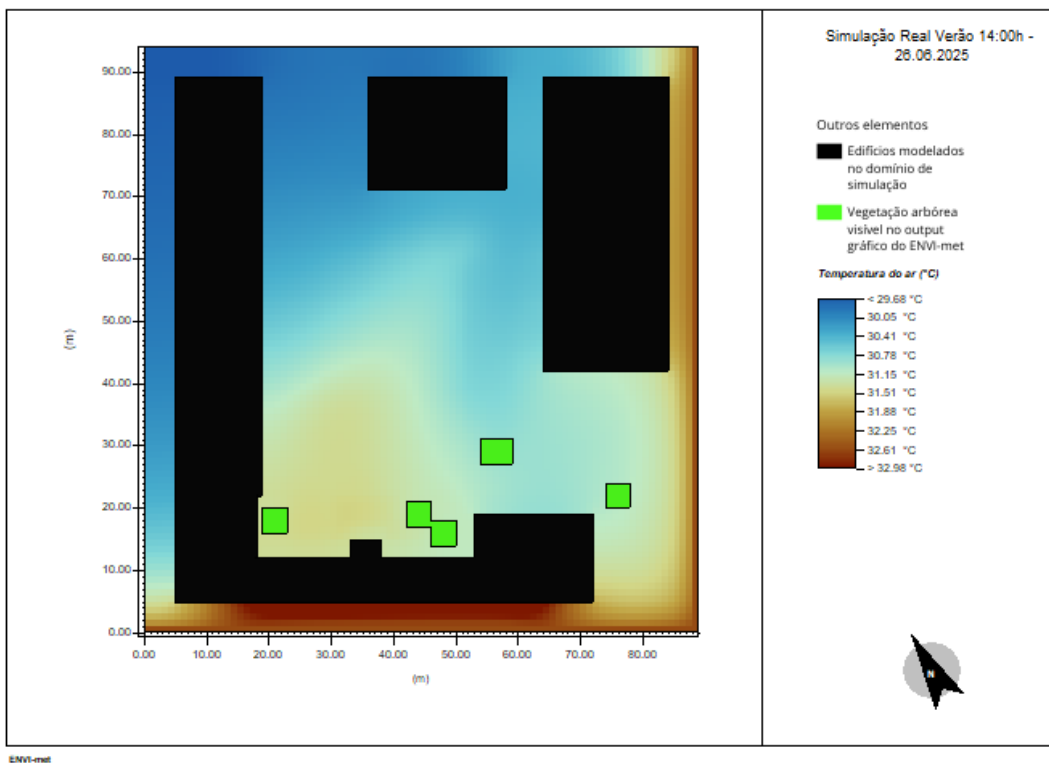


Figura 29: Mapa de resultados da simulação no ENVI-met para o cenário real em 26 de junho de 2025 (14:00h)

Nas horas iniciais dos dois dias de estudo, correspondentes ao período imediatamente após o nascer do sol, observa-se uma distribuição térmica relativamente homogênea, com ausência de sombras significativas no interior da praça. Este comportamento está relacionado com a baixa altura solar característica do inverno, aliada à reduzida intensidade da radiação solar nas primeiras horas da manhã, o que limita a formação de áreas sombreadas bem definidas (Oke, 1987).

Durante o período da tarde, para a simulação do dia 16 de janeiro de 2025, verifica-se a presença de zonas com temperaturas do ar ligeiramente menores, sobretudo na parte inferior do mapa próxima aos edifícios, onde o sombreamento projetado se torna mais evidente. Este padrão resulta do percurso solar mais baixo no céu durante o inverno, fazendo com que, mesmo em horários intermédios, algumas superfícies já se encontrem parcialmente à sombra, observado também em estudos de Givoni, 1998. No que diz respeito à vegetação existente, o seu contributo para o sombreamento revela-se limitado, uma vez que as espécies presentes apresentam caráter caducifólio, encontrando-se com reduzida densidade foliar nesta estação, o que diminui significativamente a sua capacidade de atenuar a incidência direta da radiação solar.

Já para a simulação do dia 26 de junho de 2025, a maior altura solar e o percurso mais elevado do sol ao longo do dia resultam numa incidência de radiação solar mais intensa sobre a área de estudo. Às 14h, devido à elevada altura solar, os edifícios não projetam sombras significativas no interior da praça, mantendo grande parte do espaço exposto à radiação solar direta. Por outro lado, a vegetação caducifólia existente na parte superior direita do mapa, encontrando-se em plena fase de desenvolvimento foliar durante o verão, apresenta copas densas que promovem o sombreamento das superfícies, contribuindo para a redução da incidência direta da radiação solar e para a atenuação das temperaturas do ar nessa área.

4.3.2 Análises para o cenário alternativo simulado

No cenário alternativo simulado, foi realizada a adição de vegetação com o objetivo de implementar soluções baseadas na natureza, o que resultou numa configuração espacial modificada. Para esta simulação, os dados de entrada utilizados no ENVI-met seguiram os mesmos critérios adotados no cenário real, assegurando a comparabilidade entre ambas as situações.

Para melhor representação das condições sazonais, foram realizadas simulações separadas para os dias 16 de janeiro de 2025 e 26 de junho de 2025 no ENVI-met. No caso da simulação do período de inverno, o domínio foi definido inicialmente com um determinado número de células nas direções horizontal e vertical, resultando numa altura máxima aproximada de 30 m. Já para a simulação do período de verão, foi necessário ajustar essa configuração, aumentando o número de células na vertical, ampliando a altura do domínio, e acrescentando algumas linhas de células nas bordas laterais. Essas células adicionais atuaram apenas como uma faixa de transição entre a área de estudo e os limites do modelo, logo permaneceram sem edificações ou vegetação.

Esses ajustes foram necessários para garantir que o modelo ficasse mais estável e conseguisse simular o comportamento do ar nos dias de muito calor no verão, em linha com estudos que mostram que o tamanho da área que o modelo usa e a distância até as bordas podem mudar os resultados do vento e da temperatura simulados pelo ENVI-met (Abreu-Harbich et al., 2018; Ndetto et al., 2023). Para manter a comparação entre as estações, a análise concentrou-se apenas na área comum aos dois domínios, correspondente ao núcleo da praça e ao seu entorno imediato, em que a geometria, bem como as edificações, pavimentação e vegetação existentes, foi mantida em ambas as simulações. Dessa forma, as diferenças observadas entre 16 de janeiro e 26 de junho de 2025, podem ser interpretadas como resultado das condições atmosféricas sazonais, e não de mudanças morfológicas relevantes no modelo.

Após a análise dos resultados da simulação para o inverno, observa-se que o ponto 1 apresentou tanto a maior Temperatura do Ar, com 16,01 °C às 14h, como a menor, com -1,44 °C às 8h. Esse comportamento indica que a simulação alternativa reproduz o mesmo padrão espacial que o verificado na simulação do cenário real, especialmente no ponto 1, em coerência com os dados medidos nas estações micrometeorológicas durante o período de inverno. Já para o resultado da simulação alternativa para o verão, o ponto 1 volta a registrar a maior Temperatura do Ar, com 29,59 °C às 14h, acompanhando o padrão citado anteriormente. Entretanto, a menor temperatura para esta simulação foi obtida no ponto 2, às 5h com 16,02°C.

Em relação a Temperatura média radiante, no período de inverno, o valor máximo foi registrado no ponto 3, com 40,09°C às 12h, enquanto o valor mínimo foi observado no ponto 1, com -5,01°C às 8h. Já no verão, o valor máximo foi de 64,25°C no ponto 4 às 14h e o valor mínimo foi registrado no ponto 1 às 5h com 13,18°C.

Para o cenário simulado, observa-se um comportamento térmico semelhante ao identificado no cenário base, no qual as temperaturas mais elevadas no início da manhã se concentram predominantemente nas áreas envolventes aos edifícios. Este padrão pode ser explicado pela maior retenção de calor nas superfícies construídas. A visualização deste comportamento é apresentada nas imagens seguintes.

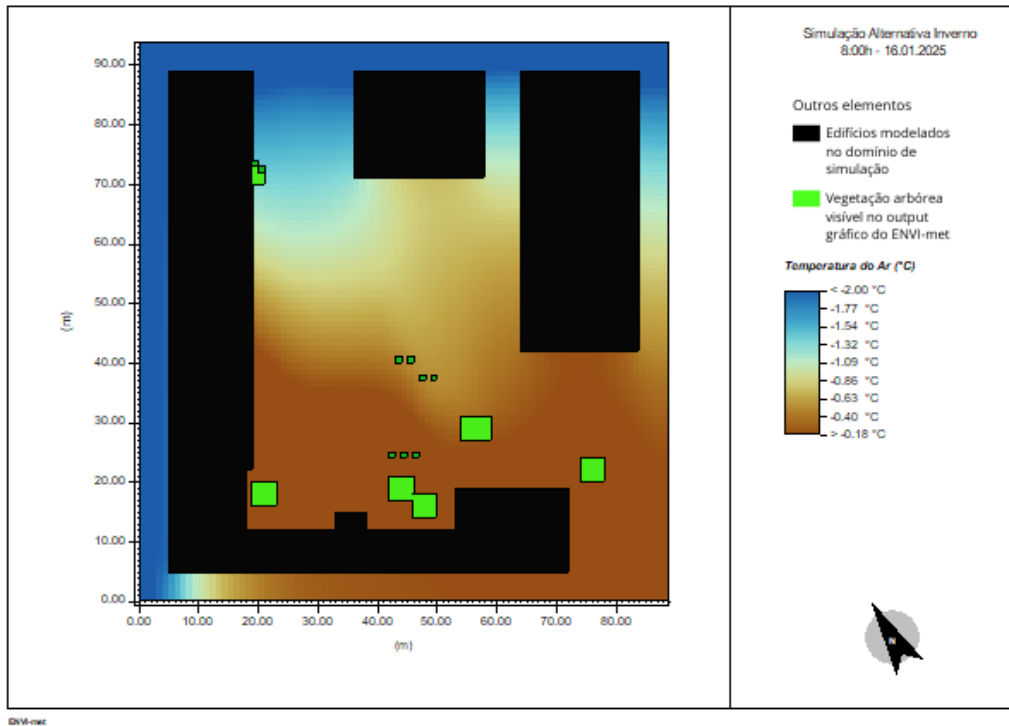


Figura 30: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo em 16 de janeiro de 2025 (8:00h)

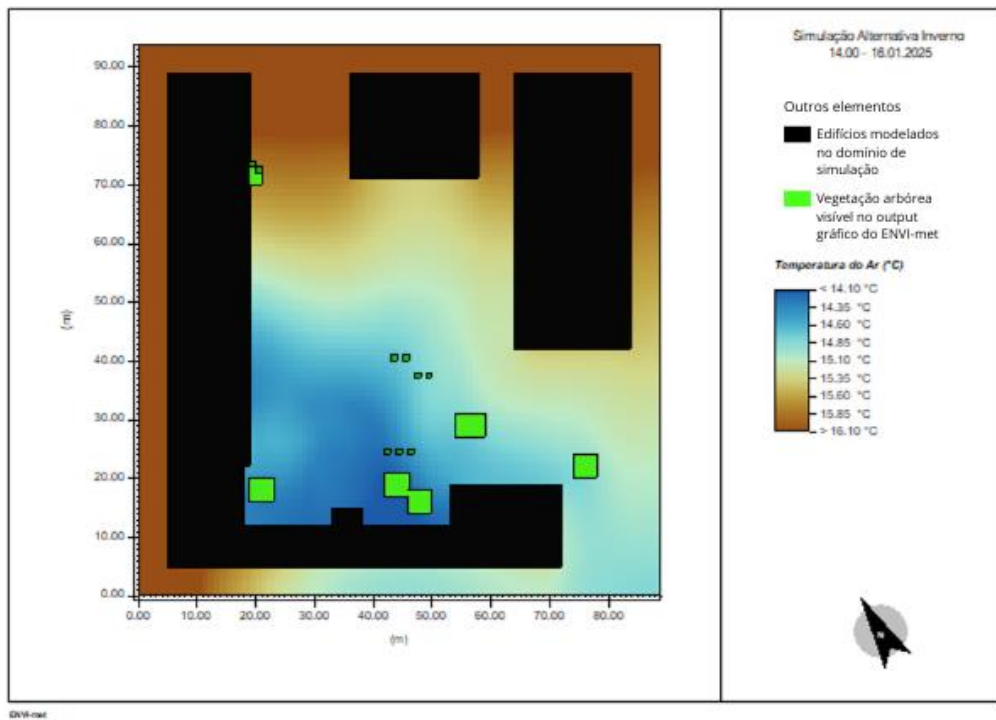


Figura 31: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo em 16 de janeiro de 2025 (14:00h)

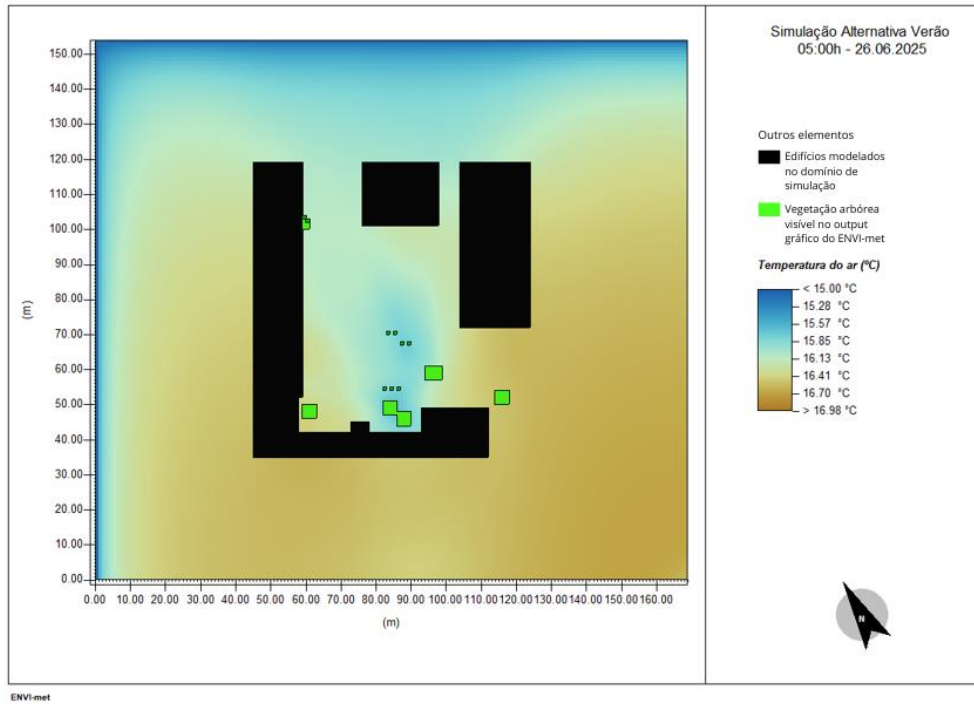


Figura 32: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo em 26 de junho de 2025 (5:00h)

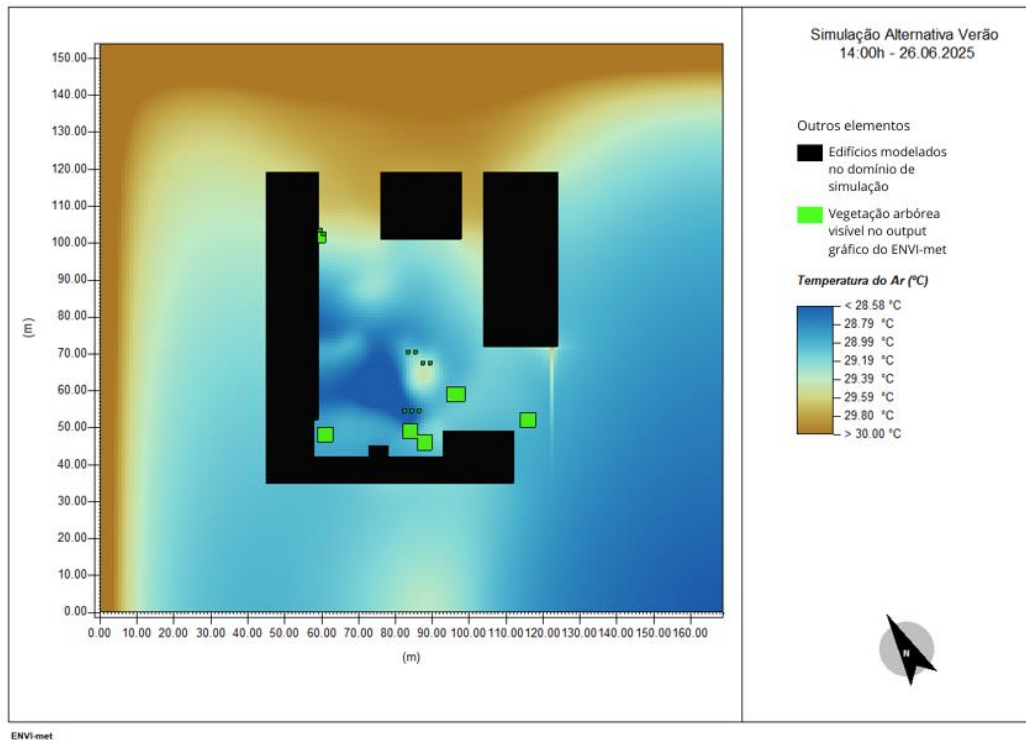


Figura 33: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo em 26 de junho de 2025 (14:00)

No cenário alternativo, que considera a inserção de vegetação na área de estudo, a análise das representações espaciais da Temperatura do Ar (Ta) revela comportamentos distintos ao longo do dia, sobretudo no que diz respeito ao sombreamento. Nos mapas correspondentes às horas iniciais do dia (8h no inverno e 5h no verão), não se observa a presença de sombras significativas no interior da praça, uma vez que o sol havia acabado de nascer, resultando numa incidência solar ainda muito reduzida.

No período da tarde, às 14h do dia 16 de janeiro de 2025, observa-se que a parte inferior do mapa apresenta valores de temperatura ligeiramente inferiores, o que pode ser associado à sombra projetada pelo edifício localizado nessa zona. Este comportamento está relacionado com a menor altura solar característica do período de inverno, em que o sol descreve um percurso mais baixo no céu e se põe mais cedo, fazendo com que, às 14h, algumas áreas já se encontrem parcialmente sombreadas. Neste caso, não é possível estabelecer uma relação direta com o sombreamento da vegetação inserida, uma vez que as espécies consideradas são de carácter caducifólio, como o *Acer campestre*, representando árvores de médio porte, cuja perda de folhagem no inverno reduz significativamente a capacidade de sombreamento.

Na simulação do dia 26 de junho de 2025, por sua vez, observa-se que a zona central da praça apresenta temperaturas do ar ligeiramente inferiores em comparação com as áreas periféricas. Este comportamento pode ser associado à presença da vegetação inserida, que, durante o verão, apresenta copas densas e folhosas, promovendo o sombreamento e contribuindo para a redução térmica local. A diferença observada entre o centro da praça e as extremidades sugere, assim, um efeito combinado do sombreamento proporcionado pela vegetação e da maior exposição solar das áreas periféricas.

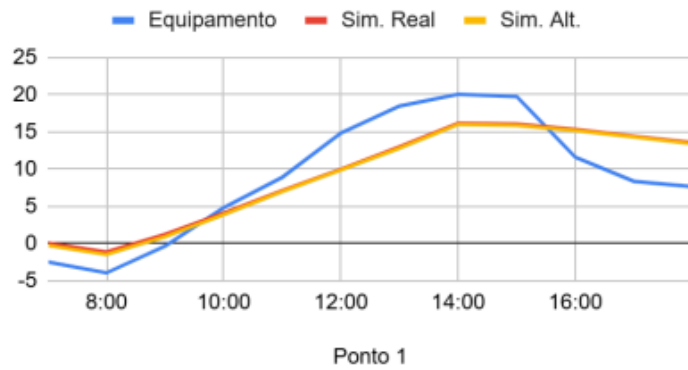
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE A MONITORIZAÇÃO E OS CENÁRIOS SIMULADOS

Realizou-se a comparação entre os dados obtidos pelas medições das estações micrometeorológicas e os dados resultantes da simulação no software ENVI-met com a intenção de validar os modelos por meio de correlações e observar a variação dos dados ao longo do dia.

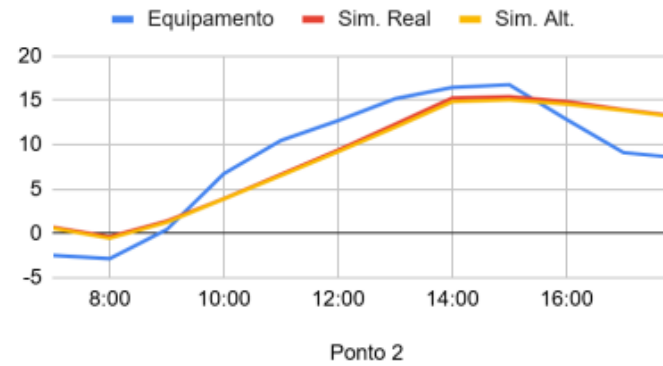
4.3.1 Comparações realizadas no período de inverno

Para as comparações, foram utilizados dados medidos das estações micrometeorológicas e dados resultantes das simulações do software ENVI-met, do cenário real e do cenário alternativo. A figura 34 representa a comparação das curvas do comportamento da Temperatura do ar ao longo do dia nos quatro pontos de monitorização.

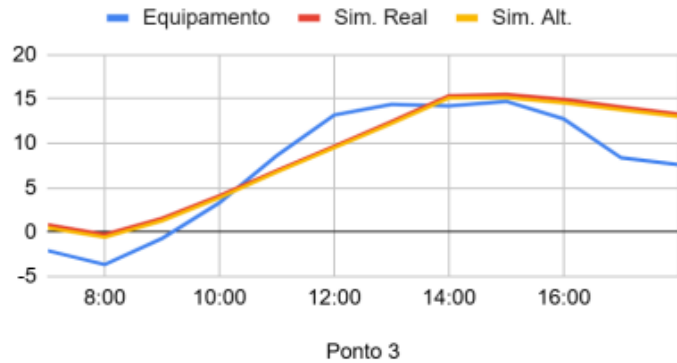
Temperatura do Ar



Temperatura do Ar



Temperatura do ar



Temperatura do Ar

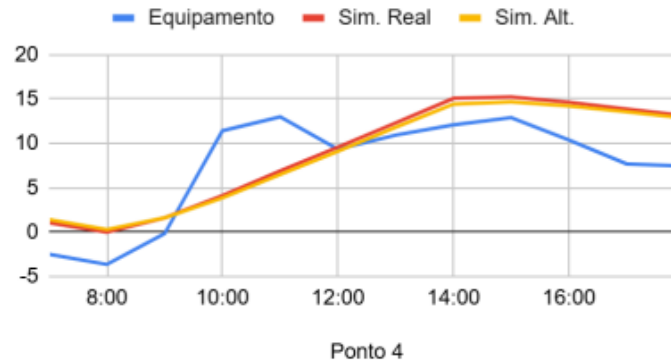


Figura 34: Comparação das curvas do comportamento da Temperatura do ar ao longo do dia nos quatro pontos

Os gráficos mostram que o modelo conseguiu reproduzir de forma geral o ciclo diário da temperatura do ar medido pelas estações micrometeorológicas. Em todos os pontos, as três curvas apresentam um comportamento semelhante, com temperaturas mais baixas no início da manhã, aumento progressivo até o começo ou meio da tarde e depois uma queda no final do dia, o que indica que a dinâmica de aquecimento e resfriamento diário foi captada.

Nota-se que há diferenças entre as séries nos horários de pico, entre as 12h e o meio da tarde, quando a curva dos dados medidos se afasta um pouco das duas simulações, o que pode sugerir que o modelo tem mais dificuldade em representar com precisão os valores máximos de temperatura.

Ao analisar a curva correspondente ao cenário real, observa-se que esta tende a apresentar maior proximidade aos dados medidos nas estações micrometeorológicas durante boa parte do dia, particularmente no período da manhã e no final da tarde. Ainda assim, verificam-se discrepâncias entre os valores simulados e medidos, mais evidentes nos períodos associados às temperaturas máximas diurnas. Estas diferenças sugerem uma limitação do modelo na representação dos valores extremos de temperatura, podendo estar associadas à simplificação da representação de dados de entrada utilizadas no ENVI-met. Estudos de Middel et al. (2014) e Bruse (2004), destacam que esses desvios podem estar relacionados a aproximações na representação da superfície urbana, dos materiais e também a incertezas nas condições de contorno meteorológicas utilizadas como entrada no ENVI-met.

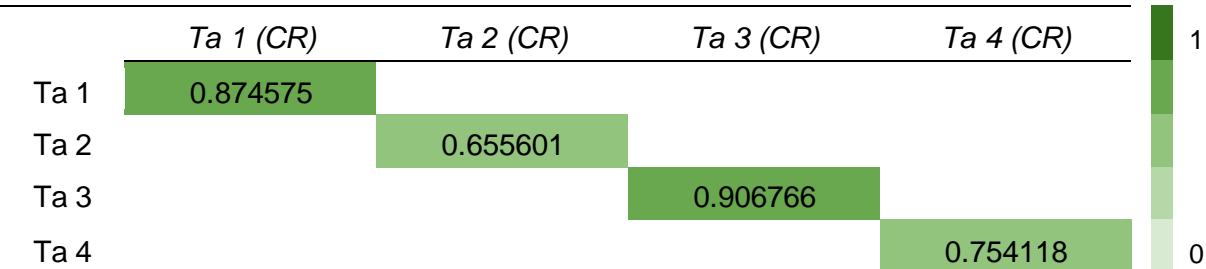
Em relação ao cenário alternativo, em que consta a inserção de soluções baseadas na natureza, nota-se uma curva de temperatura muito semelhante com a do cenário real quanto à forma geral do ciclo diário, porém com valores ligeiramente menores nos horários mais quentes. Essa pequena redução dos picos de temperatura está alinhada com o efeito esperado de maior sombreamento e evapotranspiração produzido pela vegetação que foi adicionada a este cenário, que tende a diminuir o aquecimento em escala local, assim como visto no estudo de Norton et al. (2015).

Por fim, ao comparar os quatro pontos, percebe-se que o ajuste entre medições e simulações não é uniforme em toda a área de estudo, em que a curva do cenário real em alguns pontos praticamente coincide com os dados das estações micrometeorológicas, enquanto em outros as diferenças são mais evidentes, tanto na fase de aquecimento quanto na de resfriamento. Essas observações podem indicar que existem variações locais, como por exemplo os materiais e o sombreamento, que nem sempre são totalmente representadas na malha do ENVI-met, o que pode afetar o desempenho do modelo em escala muito fina.

Para tornar a validação do modelo desenvolvido no ENVI-met mais confiável, foi necessário avaliar o grau de associação entre os conjuntos de dados. Primeiro, verificou-se a normalidade dos dados coletados nas estações micrometeorológicas e dos resultados da simulação para o cenário base. Em seguida, aplicou-se a matriz de correlação de Pearson para a variável Temperatura do Ar, para quantificar essa relação. Os valores obtidos estão apresentados na tabela 7 a seguir:

Tabela 7: Correlação de Pearson para a variável Temperatura do Ar entre os 4 pontos do cenário real (CR) e os 4 pontos medidos em campo em 16 de janeiro de 2025

	Ta 1 (CR)	Ta 2 (CR)	Ta 3 (CR)	Ta 4 (CR)
Ta 1	0.874575			
Ta 2		0.655601		
Ta 3			0.906766	
Ta 4				0.754118



Fonte: Elaboração própria.

Os coeficientes de correlação de Pearson indicam uma associação positiva entre os dados medidos e os resultados da simulação para todos os pontos analisados. No entanto, observa-se variabilidade nos valores de correlação obtidos, mesmo entre pontos com características semelhantes. Esta variabilidade pode estar associada a fatores locais e às limitações inerentes ao modelo e aos dados de entrada, que podem influenciar a correspondência entre as séries temporais simuladas e medidas.

Para tornar a comparação entre os dados mais confiável, foram avaliadas as diferenças entre os resultados. Dessa forma, em cada ponto e para todos os horários, calculou-se a variação da Temperatura do Ar (Ta) e da Temperatura Média Radiante (Tmr). Nesse processo, subtraiu-se os valores do Cenário Base, obtidos na simulação, pelos valores dos dados obtidos nas estações micrometeorológicas, gerando assim um novo conjunto de dados. A tabela a seguir apresenta os valores resultantes para a variação da Temperatura do Ar:

Tabela 8: Diferença entre Temperatura do Ar do Equipamento e o Cenário Real Simulado no dia 16 de janeiro de 2025

Diferença entre Temperatura do Ar do Equipamento X Cenário Real Simulado				
Horário	Ponto 1 (°C)	Ponto 2 (°C)	Ponto 3 (°C)	Ponto 4 (°C)
7:00	-2.53	-3.19	-2.91	-3.56
8:00	-2.82	-2.47	-3.41	-3.62
9:00	-1.56	-0.94	-2.26	-1.78
10:00	0.74	2.82	-0.78	7.31
11:00	1.80	3.85	1.71	6.08
12:00	4.86	3.32	3.54	-0.25
13:00	5.45	2.87	1.92	-1.38
14:00	3.91	1.21	-1.14	-2.99
15:00	3.70	1.33	-0.79	-2.34
16:00	-3.72	-2.00	-2.19	-4.27
17:00	-6.06	-4.83	-5.72	-6.18
18:00	-5.92	-4.66	-5.72	-5.66

Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar a tabela 8, percebe-se que a diferença entre a temperatura do ar medida e a simulada varia bastante ao longo do dia e entre os pontos. No início da manhã, o modelo tende a superestimar a T_a , apresentando valores negativos em quase todos os pontos, enquanto, entre o fim da manhã e o meio da tarde, as diferenças se aproximam de zero ou ficam levemente positivas, indicando melhor ajuste do modelo nesse intervalo. No final da tarde voltam a aparecer maiores diferenças negativas, sugerindo que o software ENVI-met pode ter mais dificuldade em representar períodos mais frios do dia do que o período de aquecimento. Para os dados do dia 16 de janeiro de 2025, a maior diferença negativa foi de -6,18, às 17h no ponto 4, e a maior diferença positiva foi de 7,31, às 10h no mesmo ponto.

Tabela 9: Diferença entre Temperatura Média Radiante do Equipamento e o Cenário Real Simulado no dia 16 de janeiro de 2025

Diferença entre Temperatura Média Radiante do Equipamento X Cenário Real Simulado				
Horário	Ponto 1 (°C)	Ponto 2 (°C)	Ponto 3 (°C)	Ponto 4 (°C)
7:00	1.77	2.63	0.99	-1.69
8:00	3.79	6.05	0.95	2.49
9:00	7.36	-1.06	2.31	5.56
10:00	36.81	28.37	6.55	3.05
11:00	44.62	39.84	9.00	30.86
12:00	27.92	7.99	3.43	-27.11
13:00	5.74	3.96	6.50	-5.60
14:00	-1.54	2.81	1.99	0.82
15:00	-1.35	1.48	-0.01	15.67
16:00	-2.32	-16.30	-16.24	-4.27
17:00	-5.00	-7.52	-5.74	-5.44
18:00	-5.74	-9.16	-6.88	-5.51

Fonte: Elaboração própria.

Na tabela 9, observamos as diferenças na Temperatura Média Radiante. Percebe-se que essas diferenças são maiores e mais irregulares do que na Temperatura do Ar. No fim da manhã, entre 10h e 12h, o modelo tende a subestimar fortemente a Temperatura Média Radiante em vários pontos, com desvios de 30–40 °C em alguns casos, o que pode sugerir dificuldade em representar o balanço de radiação nesses horários. Já no início da manhã e no final da tarde os valores ficam mais próximos de zero, chegando a ser negativos em vários horários, evidenciando a diminuição das diferenças quando a carga de radiação é menor.

4.4.2 Comparações realizadas no período de verão

A Figura 35 representa a comparação das curvas do comportamento da Temperatura do ar no decorrer do dia nos quatro pontos de estudo. Os pontos são referentes aos locais de medição dos dados das estações micrometeorológicas e as curvas representadas são referentes aos dados da simulação com o cenário real, com o cenário alternativo e dados medidos pelos equipamentos em campo.

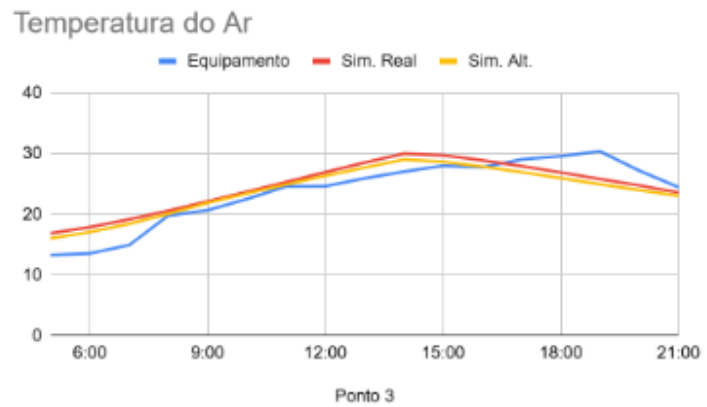
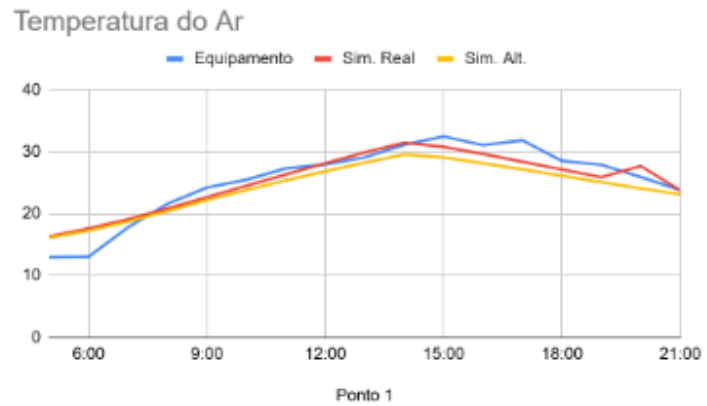


Figura 35: Comparação das curvas do comportamento da Temperatura do ar no decorrer do dia nos quatro pontos de estudo

Assim como nas comparações realizadas para o período de inverno, os gráficos mostram que o modelo conseguiu reproduzir o ciclo diário da temperatura do ar medido pelos equipamentos em campo, em que as três curvas apresentam temperaturas mais baixas no início da manhã, aumento progressivo até o começo ou meio da tarde e depois uma queda no fim do dia, destacando novamente a dinâmica de aquecimento e resfriamento diário.

Analisando-se a curva do cenário simulado real com a curva do cenário simulado alternativo, percebe-se que ambas apresentam um comportamento semelhante quanto a forma geral do ciclo diário, com valores um pouco mais elevados para o cenário real, principalmente no período referente ao meio da manhã até o fim da tarde. Assim como na simulação realizada para o inverno, essa redução se deve ao incremento de vegetação, que auxilia com maior sombreamento e evapotranspiração e diminui o aquecimento em escala local. Este fenômeno fica ainda mais evidenciado no período de verão, em que se percebe diferenças de temperaturas de até 1°C em alguns pontos.

Em geral, as curvas simuladas ficam próximas às medições, mas há horários em que o equipamento registra temperaturas um pouco mais altas, especialmente nos picos diários, indicando que os cenários simulados tendem a subestimar levemente as máximas em alguns pontos.

Observando os quatro pontos, percebe-se que a correspondência entre as curvas medidas e simuladas não é igual em toda a área de estudo. Em alguns trechos e horários, a simulação do cenário real acompanha mais perto os valores registrados pelas estações, enquanto em outros as diferenças ficam mais claras, tanto na fase de aquecimento quanto na de resfriamento ao longo do dia. Esse padrão indica a influência de variações locais nas condições do entorno, como tipo de material das superfícies, presença de sombra ou configuração das edificações, que nem sempre são captadas com precisão na malha do ENVI-met.

Assim como no período de inverno, no verão também analisou-se o grau de associação entre os dados, em que verificou-se a normalidade entre dados medidos pelas estações micrometeorológicas e dados resultantes da simulação do cenário real. Em seguida, analisou-se a matriz de Correlação de Pearson, buscando uma validação para o modelo criado no ENVI-met. A tabela a seguir mostra os resultados:

Tabela 10: Correlação de Pearson para a variável Temperatura do Ar entre os 4 pontos do cenário real (CR) e os 4 pontos medidos em campo no dia 26 de junho de 2025



Fonte: Elaboração própria.

A matriz de correlação de Pearson para o verão mostra uma associação muito forte e positiva em todos os pontos analisados. Os coeficientes variam de 0,904 a 0,961, mostrando que o modelo reproduz de forma consistente o comportamento temporal da temperatura do ar neste período, o que reforça a sua validade para representar as condições microclimáticas de verão na área de estudo.

Para os resultados do dia 26 de junho de 2025, em cada ponto e horário, foram novamente comparados os valores medidos e os valores do modelo, gerando um novo conjunto de variações para a Temperatura do Ar e para a Temperatura Média Radiante. Os padrões encontrados para esse dia mostraram-se muito semelhantes aos do primeiro, e as Tabelas 11 e 12 a seguir reúnem todos os valores obtidos nesse processo.

Tabela 11: Diferença entre Temperatura do ar do Equipamento e o Cenário Simulado Real no dia 26 de junho de 2025

Diferença entre Temperatura do ar do Equipamento X Cenário Simulado Real				
Horário	Ponto 1 (°C)	Ponto 2 (°C)	Ponto 3 (°C)	Ponto 4 (°C)
5:00	-3.33	-3.28	-3.60	-3.36
6:00	-4.57	-4.24	-4.33	-4.38
7:00	-1.28	-4.19	-4.26	-1.99
8:00	0.77	-1.59	-0.82	3.33
9:00	1.57	-0.98	-1.47	4.40
10:00	0.96	-0.59	-1.18	4.29
11:00	0.97	-1.05	-0.73	3.65
12:00	-0.21	-2.10	-2.32	3.40
13:00	-0.78	-1.84	-2.58	2.25
14:00	-0.33	-2.40	-2.96	0.42
15:00	1.69	-0.97	-1.71	-1.22
16:00	1.46	-0.20	-1.16	-1.42
17:00	3.46	2.18	1.11	0.03
18:00	1.39	3.41	2.68	0.81
19:00	2.01	2.73	4.57	1.36
20:00	-1.79	1.84	2.44	0.86
21:00	0.06	0.97	0.85	0.16

Fonte: Elaboração própria.

A tabela mostra que, em vários horários do dia, as diferenças entre as temperaturas medidas e simuladas são bastante variáveis, alternando entre valores negativos e positivos. Logo, no início da manhã, predominam diferenças negativas, indicando que a simulação tende a sobrestimar a temperatura do ar em relação às medições, enquanto, ao longo do dia, surgem também diferenças positivas, quando o modelo passa a subestimar a temperatura do ar observada. Ademais, os quatro pontos não apresentam um comportamento semelhante, em que ao analisar-se em um mesmo horário, um ponto pode mostrar diferença positiva e outra negativa. A maior diferença foi registrada no ponto 3, com 4,57 °C às 19h, enquanto a menor diferença foi de -4,57 °C no ponto 1 às 6h.

A tabela 12 indica que a diferença entre a Temperatura Média Radiante medida pelas estações e a simulada varia bastante ao longo do dia, com valores tanto negativos quanto positivos nos quatro pontos analisados. Em alguns horários, como entre 6h e 9h em certos pontos, aparecem diferenças elevadas, o que mostra uma certa discrepância entre o modelo e as medições em termos de carga radiante. Nota-se também que os pontos não seguem o mesmo padrão, enquanto um apresenta diferença positiva elevada, outro pode mostrar diferença negativa no mesmo horário, reforçando que o modelo tem dificuldade em representar o balanço de radiação nessas condições, provavelmente por sensibilidade ao sombreamento ou propriedades dos materiais.

Tabela 12: Diferença entre Temperatura Média Radiante do Equipamento e o Cenário Simulado Real no dia 26 de junho de 2025

Diferença entre Temperatura Média Radiante do Equipamento X Cenário Simulado Real				
Horário	Ponto 1 (°C)	Ponto 2 (°C)	Ponto 3 (°C)	Ponto 4 (°C)
5:00	-0.98	-1.20	1.67	-0.10
6:00	-17.12	-4.61	-1.57	-1.80
7:00	-17.08	-1.98	0.82	13.59
8:00	-10.80	14.41	-19.22	-9.06
9:00	-8.41	30.34	-13.81	-3.96
10:00	-3.00	3.04	-2.04	-4.57
11:00	0.88	4.16	3.63	-6.16
12:00	6.49	8.21	-2.86	-2.21
13:00	7.71	5.91	-2.11	-1.49
14:00	3.28	2.64	-0.28	-12.19
15:00	1.58	7.51	-4.43	-33.38
16:00	15.36	-7.32	-29.37	-16.13
17:00	17.75	8.54	-21.64	-3.52
18:00	2.91	11.29	-11.98	-1.48
19:00	4.50	13.45	10.38	1.10
20:00	3.01	3.93	9.74	1.71
21:00	2.76	3.38	3.03	2.52

Fonte: Elaboração própria.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE O CENÁRIO REAL E ALTERNATIVO

O ENVI-met possui ferramentas que permitem a geração de mapas, facilitando a análise e as variações na área da praça em estudo. Os mapas elaborados a seguir representam resultados em forma de diferença, obtidos a partir da subtração dos valores do cenário real em relação ao cenário alternativo, considerando os dias e períodos simulados.

4.4.1 Comparações para a Temperatura do ar no inverno

No período de inverno, os mapas de diferença entre o cenário alternativo e o cenário real mostram variações térmicas de magnitude pequena, em que nota-se leves resfriamentos e aquecimentos em diferentes partes da área de estudo. Esse comportamento é coerente com a época mais fria, visto que a vegetação ainda interfere no microclima, pois refresca menos, porque recebe menor radiação solar e sofre menos evapotranspiração, enfraquecendo o sombreamento e a dissipação de calor que é mais comum no verão (Gondim et al., 2023; Nguyen & Reiter, 2021).

No início da manhã (figura 36), as áreas mais quentes encontram-se associadas a valores mais elevados do fator de visão do céu e à maior exposição à radiação solar. Mesmo na presença de árvores, no período de inverno observa-se redução do sombreamento devido à menor densidade de folhagem. Por sua vez, as áreas mais frias relacionam-se principalmente com melhores condições de ventilação, que favorecem a remoção de calor por convecção.

No início da tarde (figura 37), as diferenças entre os cenários tornam-se mais suaves, em que nota-se alguns pontos um pouco mais quente e outros um pouco mais frio. As temperaturas mais baixas associam-se principalmente ao sombreamento projetado pelos troncos das árvores, característico do período de inverno. Por outro lado, as áreas mais quentes relacionam-se com condições de menor ventilação local, nas quais a dissipação de calor se torna menos eficiente.

Assim, percebe-se que a vegetação possui um efeito moderador, que é capaz de suavizar extremos térmicos, mas sem grandes contrastes no que se refere à área de estudo, padrão semelhante já observado em simulações de microclima urbano que comparam cenários arborizados e não arborizados nas condições de inverno (SpringerOpen, 2016).

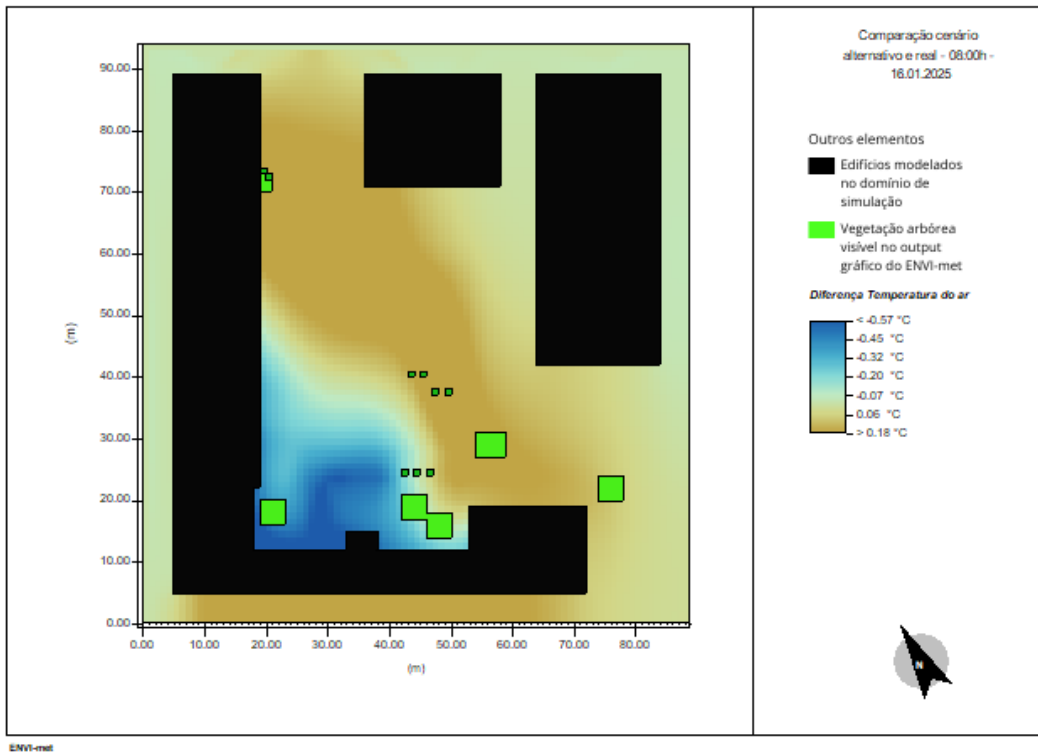


Figura 36: Mapa de compara o entre cenário alternativo e real no dia 16 de janeiro de 2025 para a temperatura do ar (8:00h)

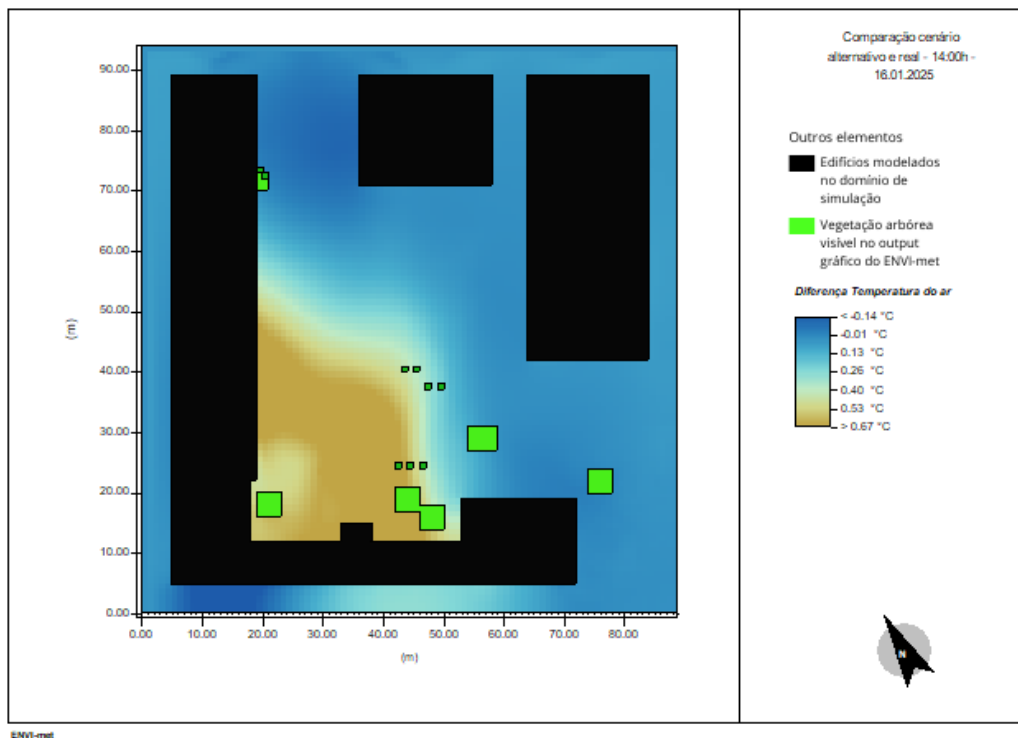


Figura 37: Mapa de compara o entre cenário alternativo e real no dia 16 de janeiro de 2025 para a temperatura do ar (14:00h)

Além disso, o efeito térmico da vegetação não se distribui de forma homogênea, em que se percebe, mesmo dentro da área verde, células com pouca ou nenhuma diferença, enquanto outras possuem variações ligeiramente maiores, evidenciando o papel da geometria urbana, do sombreamento e da exposição ao vento (Simon et al., 2003; Gondim et al., 2023).

Estudos sobre o uso do ENVI-met destacam que o ganho de conforto térmico associado à inserção de vegetação depende da configuração espacial urbana e do período analisado, sendo mais evidente em cenários de verão, quando a carga de radiação é mais elevada. No inverno, a presença de árvores contribui para a redução da incidência de radiação solar direta durante o dia, enquanto no período noturno a diminuição do fator de visão do céu (FVC) pode atenuar a perda de calor por emissão de radiação de grande comprimento de onda, influenciando o comportamento térmico do espaço (Nguyen & Reiter, 2021; SpringerOpen, 2016).

4.4.2 Comparações para Temperatura Média Radiante no inverno

Os dois mapas elaborados mostram que, no dia 16 de janeiro de 2025, a inserção de vegetação altera de forma expressiva a temperatura média radiante, sobretudo nas áreas centrais onde o dossel ocupa maior extensão.

Às 8h, predomina um forte resfriamento radiativo na região vegetada, com diferenças negativas que ultrapassam vários graus Celsius, indicando redução significativa da carga de radiação incidente sobre o pedestre em comparação ao cenário real. Os menores valores de TMR estão associados a áreas com menor fator de visão de céu, que recebem menos radiação solar no início da manhã e, por isso, aquecem mais lentamente.

No início da tarde, às 14h (Figura 39), todos os valores de TMR são negativos, indicando temperaturas médias radiantes menores no cenário alternativo em relação ao cenário real. Essa redução está associada principalmente ao sombreamento gerado pelos troncos das árvores inseridas, que diminui a incidência direta de radiação sobre as superfícies.

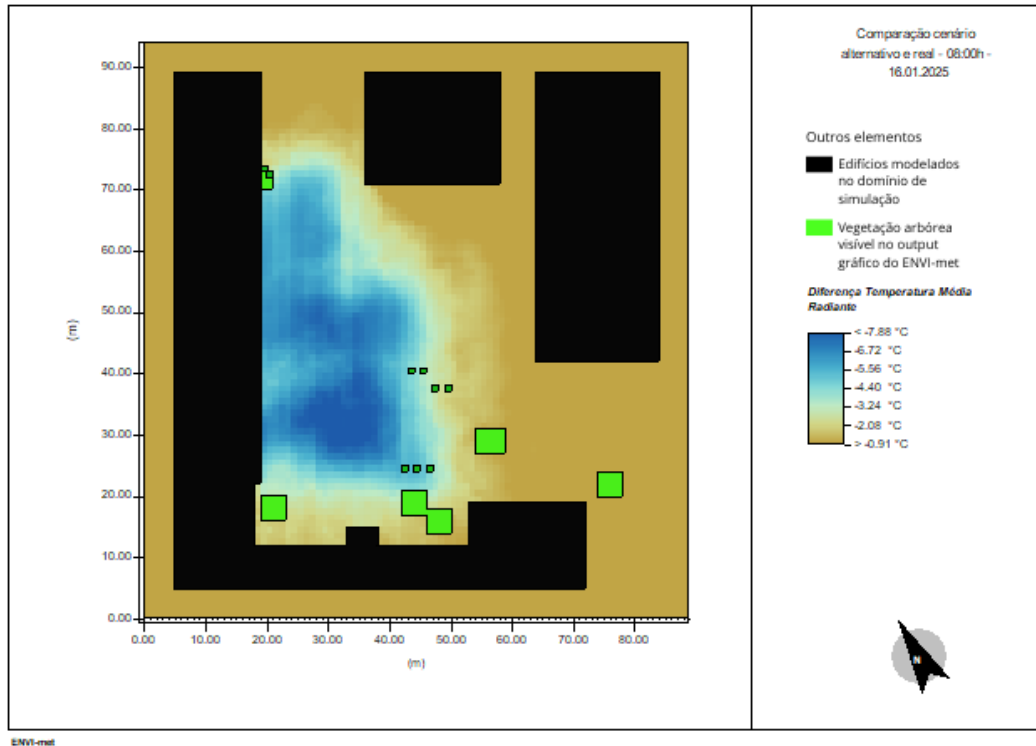


Figura 38: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 16 de janeiro de 2025 para a temperatura média radiante (8:00h)

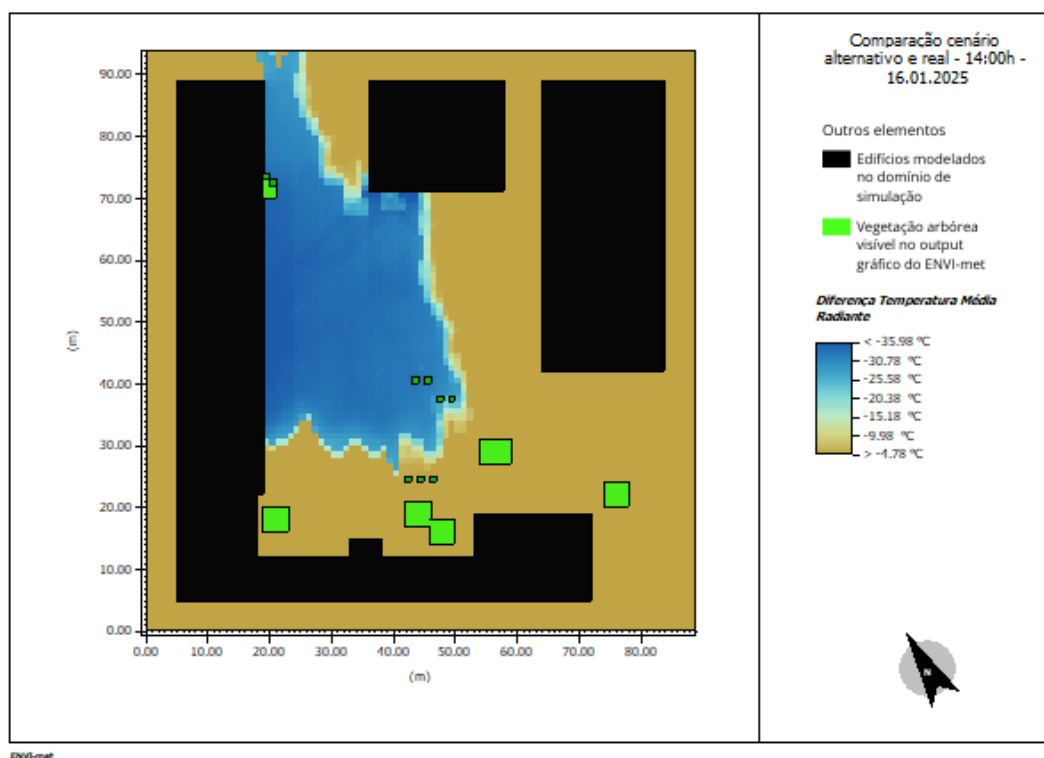


Figura 39: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 16 de janeiro de 2025 para a temperatura média radiante (14:00h)

Esse padrão é coerente com a literatura, que destaca a sensibilidade da TMR à presença de árvores e outras superfícies que interceptam a radiação de onda curta e longa, tornando essa variável muito mais responsiva ao sombreamento e à geometria urbana do que a própria temperatura do ar (Nguyen & Reiter, 2021; Simon et al., 2003). Em termos de conforto térmico, os mapas sugerem que, mesmo em condições de inverno, a vegetação pode reduzir a carga radiativa em trechos específicos do espaço público, o que tende a diminuir o estresse térmico em horários de céu limpo e insolação direta, embora seja necessário avaliar caso a caso se esse resfriamento adicional é benéfico ou indesejável em função do contexto climático local (Frontiers in Built Environment, 2020; SpringerOpen, 2016).

4.4.3 Comparações para a Temperatura do ar no verão

Os mapas de diferença de temperatura do ar apresentam um padrão consistente de arrefecimento associado ao cenário alternativo, principalmente no período da tarde, quando a carga térmica é mais elevada. Em ambos os horários analisados no período da tarde, 14h e 18h (figuras 40 e 41), predominam valores negativos em praticamente toda a malha, indicando que o cenário alternativo se apresenta mais fresco do que o cenário real, com reduções que se aproximam de -1°C em alguns pontos.

Importante referir que, os mapas de diferença apresentados abaixo, foram elaborados no Microsoft Word, devido a limitações do software utilizado, que não permite o recorte de domínios distintos para a comparação direta entre cenários.

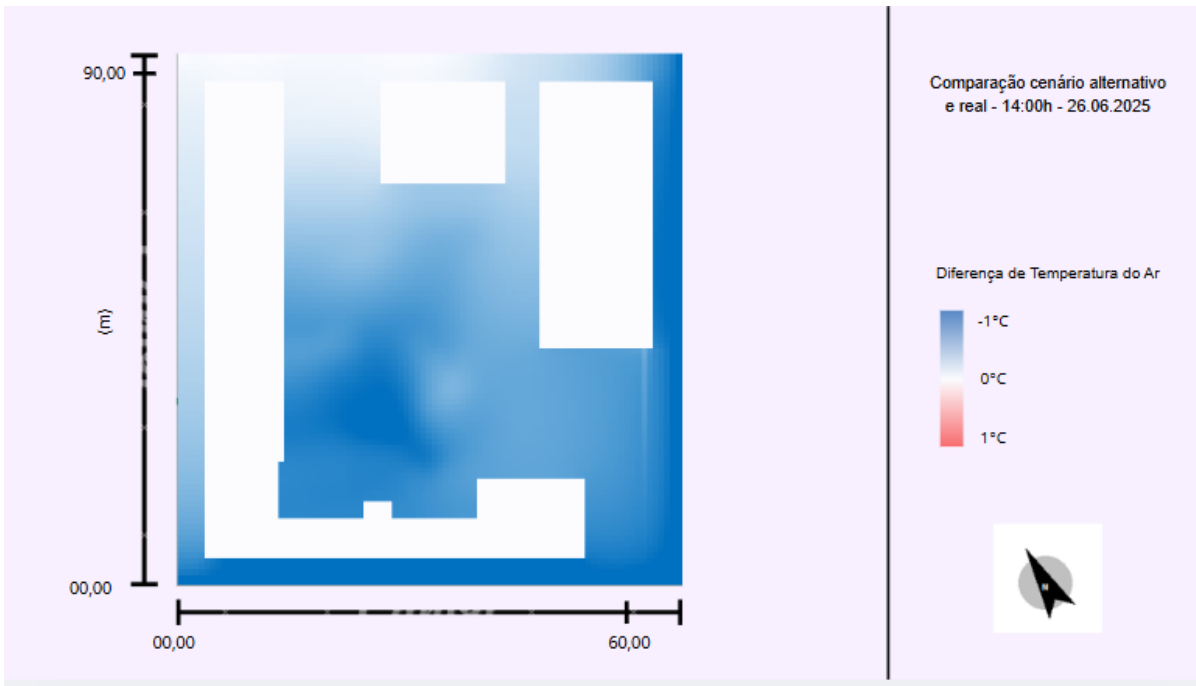


Figura 40: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura do ar (14:00h)

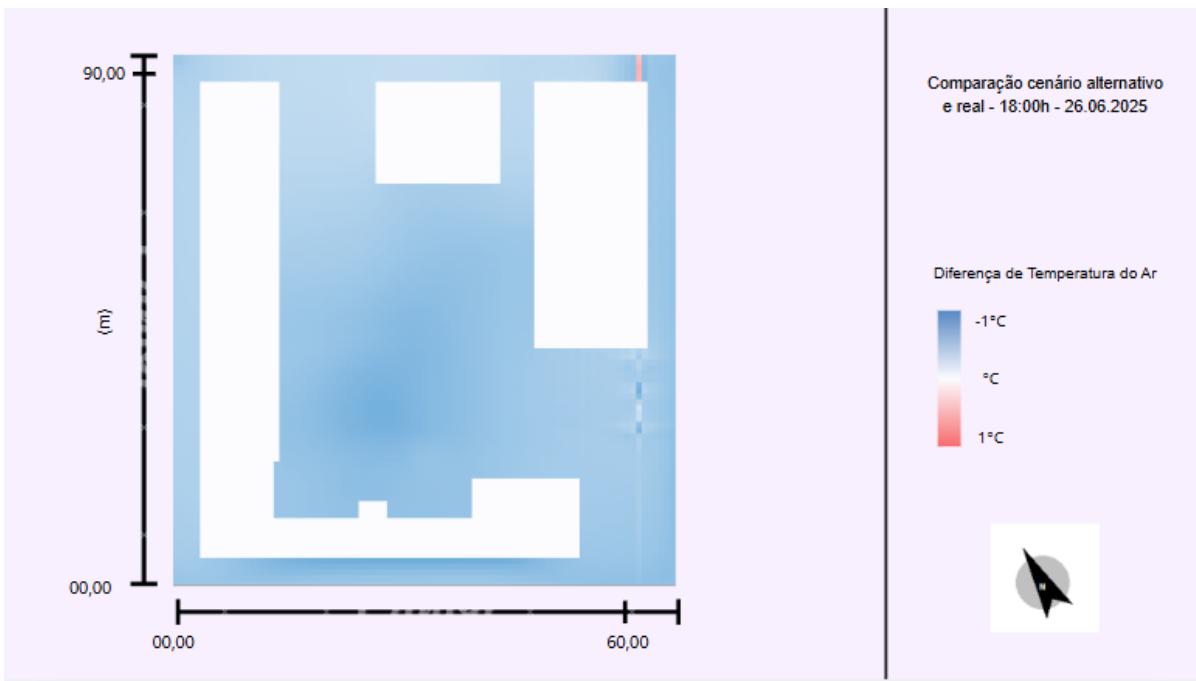


Figura 41: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura do ar (18:00h)

Na figura 42, referente ao mapa das 6h, percebe-se regiões em vermelho, o que indica que o cenário real se encontra mais fresco que o alternativo. Esse comportamento é inverso ao observado no mapa das 14h e 18h. Essa inversão pode estar relacionada à maior capacidade de retenção de calor da vegetação e do solo no cenário alternativo, que, durante a noite, liberam o calor acumulado do período diurno de modo mais lento, devido às características da vegetação e ao menor FVC desses locais. Logo, mesmo que a vegetação reduza os picos de temperatura durante o dia, o resfriamento noturno ocorre de modo mais lento, o que produz essas diferenças positivas nas primeiras horas da manhã.

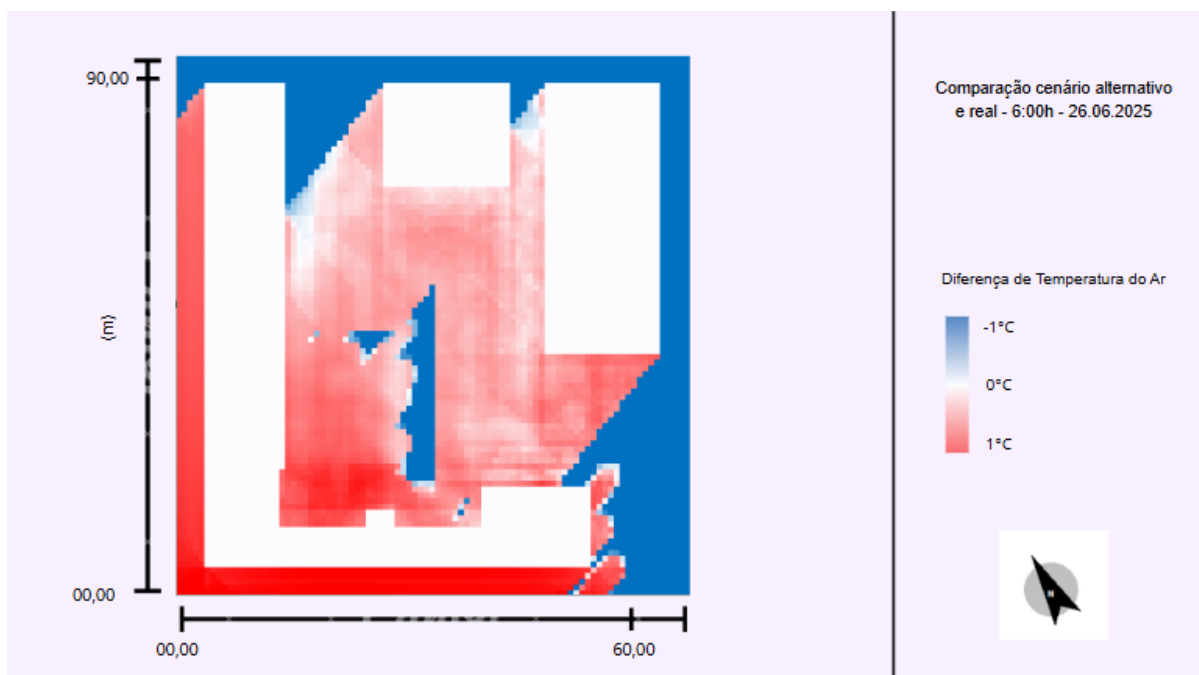


Figura 42: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura do ar (6:00h)

No mapa referente às 14h, observa-se o maior contraste térmico entre os cenários, associado principalmente ao aumento do sombreamento proporcionado pela introdução de vegetação, o que se reflete em diferenças mais acentuadas de temperatura. Já no mapa das 18h, o gradiente térmico torna-se mais suave, com a presença de áreas próximas da neutralidade, indicando uma redução progressiva da carga radiativa e uma maior homogeneização térmica associada ao início do período de arrefecimento da área de estudo.

Ao observar os mapas das 14h e 18h, nota-se um núcleo de maior arrefecimento no centro da praça, local com a área de maior acréscimo de vegetação no cenário alternativo, o que pode sugerir forte contribuição do sombreamento e da evapotranspiração, auxiliando na diminuição da temperatura do ar. Nos limites do domínio, em particular nas zonas leste e sudoeste e nas áreas próximas aos edifícios, as diferenças tornam-se menos expressivas, indicando uma atenuação do efeito da intervenção vegetal e uma maior aproximação entre os valores simulados nos dois cenários.

4.4.4 Comparações para a Temperatura Média Radiante no verão

Os mapas de diferença para temperatura média radiante mostram um efeito ainda mais marcado da inserção de vegetação no cenário alternativo, em que nota-se reduções significativas principalmente no centro da área de estudo durante o período diurno. Em contrapartida, nas primeiras horas da manhã observa-se o mesmo padrão observado para a temperatura do ar, com alternância de áreas mais frescas e mais quentes no cenário alternativo em relação ao real.

Às 6h da manhã (figura 43), o mapa revela uma distribuição um pouco mais variada, com manchas azuis e vermelhas espalhadas pelo domínio, incluindo áreas em que o cenário alternativo é mais quente e outras em que continua mais fresco que o real, evidenciando o comportamento que ocorreu em temperatura do ar.

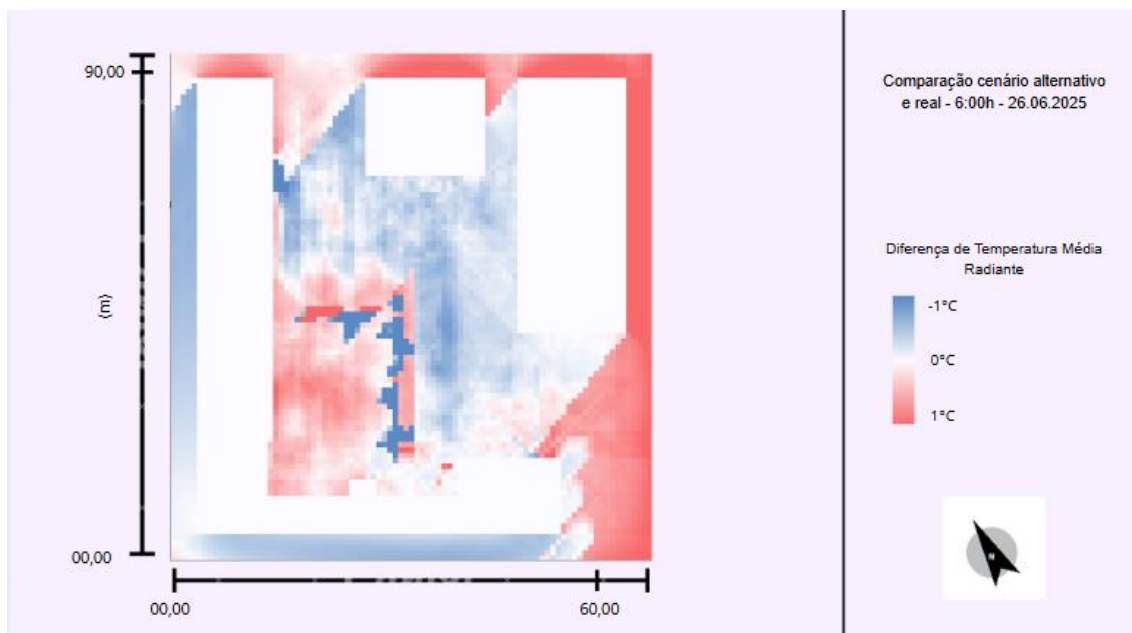


Figura 43: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura média radiante (6:00h)

Já na figura 44, às 14h, o centro da praça apresenta valores de temperatura média radiante inferiores no cenário alternativo em comparação com o cenário real, evidenciando o efeito da intervenção vegetal, próxima de -10°C . No mapa das 18h (figura 45), o cenário alternativo mantém valores de temperatura média radiante globalmente mais baixos, embora com diferenças menos acentuadas, indicando a persistência de um ambiente termicamente mais favorável comparado ao cenário real.

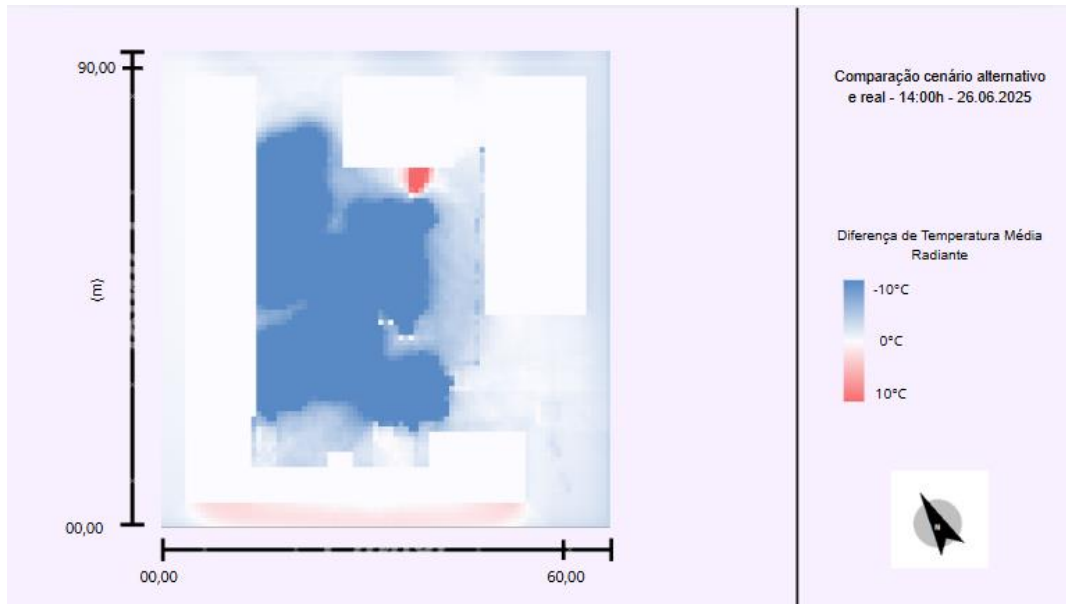


Figura 44: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura média radiante (14:00h)

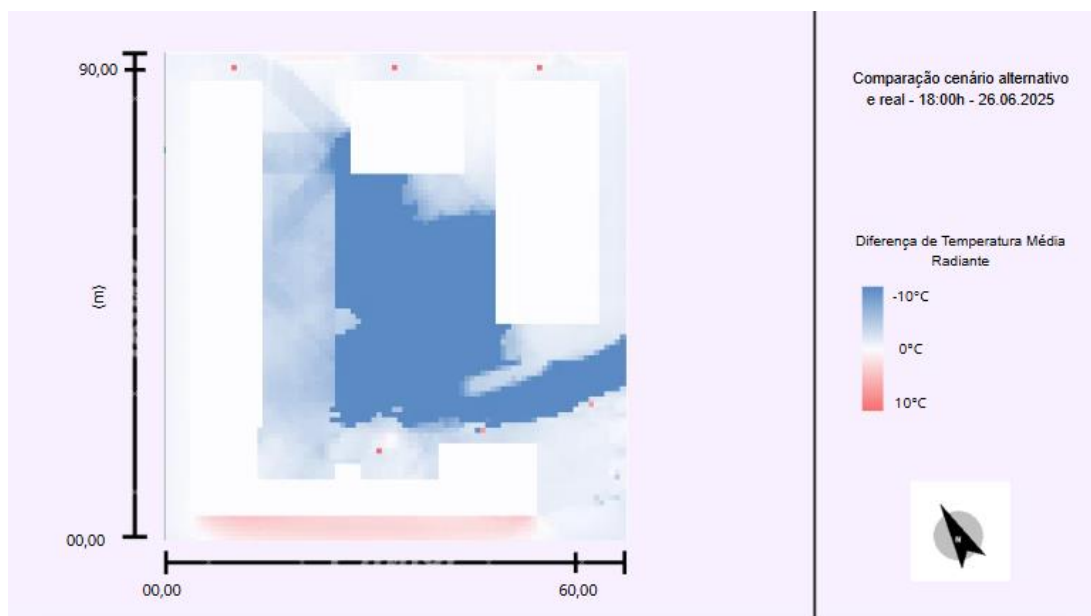


Figura 45: Mapa de comparação entre cenário alternativo e real no dia 26 de junho de 2025 para a temperatura média radiante (18:00h)

4.5 CÁLCULO DO PMV (Predicted Mean Vote – Voto Médio Previsto)

Com o intuito de aprofundar as análises relacionadas ao conforto térmico, foram realizados os cálculos para obtenção do índice Predicted Mean Vote (PMV) para o horário de maior temperatura observado para a campanha de inverno e para a campanha de verão.

O PMV foi desenvolvido para avaliar conforto térmico em interiores, para atividades sedentárias e condições moderadas definidas por normas como a ISO 7730. Em exteriores, não representa bem condições de sol direto, vento e adaptação das pessoas, podendo superestimar o desconforto em frio quando comparado a índices como o UTCI (Blazejczyk et al., 2012). Contudo, continua a ser usado como indicador comparativo entre diferentes soluções de projeto urbano, sendo uma maneira acessível para comparações. Logo, nesta pesquisa o PMV é usado apenas como índice comparativo de conforto entre pontos e cenários, nos períodos de maior temperatura, sendo aplicado fora do seu domínio clássico e não como previsão exata da sensação térmica dos indivíduos.

A partir dos dados micrometeorológicos medidos e dos resultados das simulações do ENVI-met, tanto do cenário real quanto do cenário alternativo, selecionaram-se, para cada dia, os instantes correspondentes à temperatura máxima do ar. Após isso, parâmetros como clo, met (1,5), temperatura do ar (t_a), temperatura média radiante (t_{mr}), velocidade do vento (v_a) e humidade relativa (HR) (Tabela 13), foram utilizados para calcular o índice PMV em ambas campanhas. Ressalta-se que os dados micrometeorológicos utilizados correspondem a médias horárias, sendo o instante selecionado representativo da hora em que se registrou a temperatura máxima do ar em cada dia de análise.

Tabela 13: Parâmetros utilizados para o cálculo do PMV

		DADOS MEDIDOS				CENÁRIO REAL				CENÁRIO ALTERNATIVO			
	Ponto	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
INVERNO		14:00h				14:00h				14:00h			
	clo	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
	met	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Ta	20.06	12.09	14.22	16.47	16.15	15.08	15.36	15.26	16.01	14.43	15.11	14.85
	Tmr	44.1	16.6	20.8	49.5	45.67	15.81	18.76	46.72	14.5	15.98	16.84	13.9
	Va	1.11	0.46	0.51	0.83	3.26	2.15	1.69	1.7	2.57	1.54	2.09	1.01
	HR	26.28	38.23	32.46	21.09	53.67	57.12	56.44	89.34	78.6	96.07	55.54	88.86
VERÃO		15:00h				14:00h				14:00h			
	clo	0.3	0.3	0.3	0.3	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
	met	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Ta	32.51	29.71	28.04	29.08	31.49	31.12	30.03	30.64	29.59	28.73	29.04	28.98
	Tmr	65.43	75.46	35.98	33.73	64.06	67.88	36.83	68.51	36.03	30.53	29.96	64.25
	Va	1.11	1.32	0.67	1.44	2.79	2.79	2.31	0.41	2.58	1.6	2.02	0.62
	HR	34.2	26.9	32.5	25.7	31.62	29.24	30.14	28.51	30.7	32.84	32.05	32.63

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 14 apresentam-se os valores de PMV obtidos para os quatro pontos de medição, nas devidas condições citadas anteriormente. Os valores foram calculados através de uma calculadora online de conforto térmico baseada no modelo de Fanger (PMV/PPD).

Tabela 14: Valores de PMV obtidos para os quatro pontos de medição

	DADOS MEDIDOS				CENÁRIO REAL				CENÁRIO ALTERNATIVO			
Ponto	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
INVERNO					14:00h							
	-1.29	-3.42	-2.37	-2.1	-2.66	-2.75	-2.57	-2.5	-2.52	-2.65	-2.74	-2.36
VERÃO	15:00h				14:00h				14:00h			
	0.48	-0.36	-0.44	0.04	-0.23	-0.35	-0.57	0.37	-0.73	-0.75	-0.77	-0.22

Fonte: Elaboração própria.

No inverno, observa-se que os valores de PMV obtidos a partir dos dados medidos se situam predominantemente no intervalo de frio moderado a intenso, ou seja, valores negativos próximos ou inferiores a -2, o que indica uma estimativa de conforto térmico desfavorável. Mesmo que o PMV não tenha sido calculado para interpretar os votos médios reais dos indivíduos, a magnitude reforça a percepção de desconforto acentuado neste período.

Quando se comparam os dados recolhidos com a simulação do cenário real no ENVI-met, nota-se que o modelo reproduz de forma consistente a mesma tendência de desconforto por frio observada nos dados, embora ocorram algumas diferenças numéricas pontuais entre os pontos.

Já para o período de verão, os valores de PMV se encontram mais próximos do limite inferior da escala de neutralidade, mesmo que ainda apresente alguns valores em faixa de desconforto moderado por frio. Isso reflete a combinação de temperaturas do ar relativamente amenas, velocidades de vento mais elevadas e vestuário mais leve adotado para esta estação, levando a um balanço térmico menos desfavorável do que no inverno.

A comparação entre os cenários real e alternativo, tanto no inverno, quanto no verão, permite avaliar o efeito das soluções baseadas na natureza propostas para a praça. No verão, da mesma forma que se verificou nas demais comparações ao longo da pesquisa, a diferença torna-se mais evidente, principalmente devido à maior incidência de radiação solar característica dessa estação. Nota-se que em todos os pontos o índice decresceu, dando a ideia de um ambiente mais fresco, em que, mesmo nas condições dos valores permanecerem na faixa de desconforto, a diferença de magnitude entre os cenários mostra, do ponto de vista bioclimático, uma melhoria das condições térmicas locais.

Estes resultados reforçam a ideia de que, no contexto estudado, o PMV não deve ser interpretado como uma representação direta da sensação térmica percebida pelos indivíduos, mas sim como um índice físico de balanço térmico, adequado para a comparação das respostas térmicas entre diferentes pontos e cenários.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos em campo demonstraram que o comportamento térmico urbano segue padrões bem definidos, influenciados pela radiação solar e pelas características das superfícies locais. Verificou-se que a temperatura do ar e a temperatura média radiante apresentam variações distintas entre o inverno e o verão, sendo mais homogêneas no período frio e mais contrastantes na estação quente. Essa diferença reflete a exposição solar, e da presença de vegetação com efeitos sobre o sombreamento e regulação térmica dos espaços urbanos.

A análise da humidade relativa e da velocidade do vento confirmou a influência da morfologia urbana e do tipo de cobertura do solo na dinâmica microclimática. Espaços com superfícies permeáveis e vegetadas mantiveram níveis mais elevados de humidade, contribuindo para o equilíbrio térmico e para melhores condições de conforto ambiental na Praça José Adriano.

As percepções térmicas registadas nos questionários apresentaram correspondência com os dados medidos, evidenciando a sensibilidade dos indivíduos às variações microclimáticas. No inverno, a sensação térmica relacionou-se principalmente com a temperatura do ar e a humidade, enquanto, no verão, também se destacou a influência do nível de vestuário. Esses resultados confirmam a influência direta das condições meteorológicas sobre o conforto térmico e reforçam a importância de considerar fatores sazonais e de desenho urbano para promover ambientes mais confortáveis e sustentáveis.

A comparação entre os cenários simulados no ENVI-met e as medições em campo mostrou boa correspondência dos padrões térmicos, confirmando a capacidade do modelo em reproduzir as condições microclimáticas reais. Tanto no inverno, quanto no verão, os pontos extremos de temperatura coincidiram entre a simulação e o campo, o que evidencia um padrão coerente. O cenário com vegetação apresentou redução das temperaturas do ar e da temperatura média radiante, evidenciando o efeito das soluções baseadas na natureza.

No inverno, o modelo representou bem o ciclo diário da temperatura do ar. A temperatura média radiante apresentou maiores desvios nos horários de pico, indicando limitações na simulação da radiação direta. No verão, o desempenho manteve-se elevado, com correlações de Pearson entre 0,90 e 0,96 em todos os pontos. As curvas simuladas reproduziram corretamente as variações diárias e mostraram uma leve redução dos valores máximos das variáveis analisadas no cenário com vegetação.

Os mapas de diferença entre cenários reforçam que a inserção de vegetação tem potencial para alterar o microclima da praça de forma discreta no inverno e mais intensa no verão. No período frio, as diferenças de temperatura do ar foram pequenas e dispersas, embora a temperatura média radiante apresentasse contrastes claros nas áreas arborizadas. Já no verão, o cenário alternativo exibiu uma redução média de até 1°C na temperatura do ar e cerca de 10 °C na temperatura média radiante nas horas de maior insolação, com o núcleo mais fresco concentrado no centro arborizado da praça.

Os valores de PMV evidenciaram que o índice se mostrou mais adequado como ferramenta de comparação entre pontos e cenários do que como representação absoluta da sensação térmica em ambiente exterior, uma vez que o PMV foi originalmente desenvolvido para ambientes interiores e apresenta limitações conhecidas quando aplicado a condições externas. No inverno, os resultados apontaram desconforto por frio moderado a intenso, enquanto, no verão, se aproximaram de condições de neutralidade. O cenário com vegetação apresentou reduções sistemáticas do PMV, principalmente no verão, indicando melhoria das condições térmicas locais, mesmo que ainda não seja a condição ideal de conforto.

6 PERSPECTIVAS FUTURAS

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação temporal das medições por meio da realização de campanhas de monitorização ao longo de todo o ano, de modo a permitir uma avaliação mais robusta da variabilidade sazonal das condições microclimáticas. A extensão do período de observação possibilitará captar com maior precisão os efeitos das diferentes estações sobre as variáveis térmicas e de conforto, reduzindo incertezas associadas a campanhas pontuais e fortalecendo a representatividade dos resultados.

Adicionalmente, sugere-se a simulação de diferentes estratégias urbanas no ambiente de modelação, incluindo variações na arborização, nos materiais de superfície e na configuração morfológica do espaço urbano. A análise comparativa entre cenários de intervenção poderá fornecer subsídios técnicos mais consistentes para o apoio ao planeamento urbano bioclimático, permitindo identificar soluções com maior potencial de mitigação do desconforto térmico e de melhoria do desempenho ambiental dos espaços públicos.

Recomenda-se também a integração de indicadores complementares de conforto térmico e de qualidade ambiental, bem como a realização de análises de sensibilidade dos principais parâmetros do modelo. Essa abordagem poderá contribuir para uma compreensão mais aprofundada das incertezas associadas às simulações microclimáticas e para o aperfeiçoamento metodológico de estudos futuros.

Por fim, propõe-se a expansão do estudo para outras áreas urbanas com características morfológicas e funcionais distintas. A aplicação da metodologia em diferentes contextos permitirá avaliar a consistência e a transferibilidade dos resultados obtidos, contribuindo para a consolidação de diretrizes mais abrangentes de adaptação climática e de promoção de ambientes urbanos termicamente mais confortáveis e sustentáveis.

BIBLIOGRAFIA

- Abreu, L. V. D. (2008). *Avaliação da escala de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas* (Tese de doutorado). Universidade Estadual de Campinas.
- Abreu-Harbich, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2018). Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in urban climate studies. *Urban Climate*, 26, 188–203.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94–108.
- Almeida, R. M. S. F. (2011). *Avaliação do desempenho higrotérmico do parque escolar reabilitado* (Tese de doutorado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Alves, L. S. (2023). *Análise do conforto térmico ambiental no restaurante universitário do IEAA* (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Federal do Amazonas.
- Andrade, H. (2005). O clima urbano: Natureza, escalas de análise e aplicabilidade. *Finisterra*, 40(80).
- ASAWA, T., Hoyano, A., & Nakaohhkubo, K. (2004). Thermal design tool for outdoor space based on numerical simulation system using 3D CAD. In *Proceedings of the 21st Conference on PLEA* (pp. 1013–1018). Eindhoven, The Netherlands.
- ASHRAE. (2010). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Baker, N., & Standeven, M. (1996). Thermal comfort for free-running buildings. *Energy and Buildings*, 23(3), 175–182.
- Barbirato, G. M., Souza, L. C. L., & Torres, S. C. (2007). *Clima e cidade: A abordagem climática como subsídio para estudos urbanos*. Edufal.
- Barbosa, R. V. R. (2005). *Áreas verdes e qualidade térmica em ambientes urbanos: Estudo em microclima de Maceió (AL)* (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo.
- Battermarco, B. P., Miguez, M. G., Sousa, M. M., & Magalhães, P. C. (2017). *Urbanização sem controle x mudanças climáticas*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

Bentolila, L. B. V., Querino, C. A. S., Querino, J. K. A. S., Moura, A. R. M., & Souza, S. A. S. (2019). Conforto térmico ambiental. In A. C. de Oliveira (Ed.), *Ensaio nas ciências agrárias e ambientais 8* (pp. 138–146). Antonella Carvalho de Oliveira.

Bentolila, L. B. V., Querino, C. A. S., Querino, J. K. A. S., Santos, L. O. F., Moura, A. R. M., Martins, P. A. S., Júnior, A. L. P., Gois, D. A., & Souza, S. A. S. (2018). Índices de conforto e desconforto térmico nos municípios de Humaitá e Lábrea – AM. In *Anais do XVI ENEEAMB & IV Fórum Latino-Americano de Engenharia e Sustentabilidade* (p. 6).

Bernatzky, A. (1982). The contribution of trees and green spaces to a town climate. *Energy and Buildings*, 5, 1–10.

Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515–535.

Bonanse de Alencar Novaes, G., & Monteiro, L. M. (2022). Calibração do ENVI-met para simulações termodinâmicas em ambientes urbanos. *Ambiente Construído*, 22(3), 223–235.

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155.

Bretz, S., Akbari, H., & Rosenfeld, A. (1998). Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment*, 32(1), 95–101.

Brown, M., Grimond, S., & Ratti, C. (2001). Comparison of methodologies for computing sky view factor in urban environments. In *Proceedings of the International Symposium on Environmental Hydraulics*. ISEH/IAHR.

Bruse, M. (1999). *Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima* [Tese de doutoramento, Universität Bochum]. Alemanha.

Bruse, M. (2004). *ENVI-met 3.0: Updated model overview*. Environmental Modeling Group, University of Mainz.

Bruse, M. (2004a). *ENVI-met 3.0: Updated model overview*. ENVI-met Documentation. Essen, Alemanha.

Carfan, A. C., Galvani, E., & Nery, J. T. (2009). Análise de conforto térmico no município de Ourinhos, utilizando o modelo ENVI-met. In *Anais do XIII Congresso*

Latinoamericano e Ibérico de Meteorologia (Vol. 1, pp. 1–10). Universidade de Buenos Aires.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2020). *Soluções baseadas na natureza para um novo Brasil*. CGEE.

Chapman, L. (2007). Towards a tree-view factor: Why do urban climatologists dislike trees? *IAUC Newsletter*, 25, 4–6.

Chapman, L., Thornes, J. E., & Bradley, A. V. (2001). Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets. *Theoretical and Applied Climatology*, 69(1–2), 81–89.

Chatzipoulka, C., & Nikolopoulou, M. (2018). Urban geometry, SVF and isolation of open spaces: London and Paris. *Building Research & Information*, 46(3), 1–18.

Chen, Y., & Wong, N. H. (2006). Thermal benefits of the city parks. *Energy and Buildings*, 38, 105–120.

Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J. L., & Pearlmutter, D. (2016). Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate*, 18, 33–57.

Costa, E. C. (1982). *Arquitetura ecológica: Condicionamento térmico natural*. Editora Edgar Bücher.

Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry, and land use. *Atmospheric Environment*, 30(3), 379–392.

Evers, H., Incau, B., Caccia, L., & Corrêa, F. (2022). *Soluções baseadas na natureza para adaptação em cidades*.

Fanger, O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and application in environmental engineering*. Copenhagen.

Fante, K. P. (2019). *Eventos extremos de temperatura e seus impactos no conforto térmico humano: Estudo de caso em Presidente Prudente, Brasil, na perspectiva da geografia do clima* [Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia].

Fariña Tojo, J., Huerta, M., & Hernández, A. (n.d.). *Manual de diseño bioclimático urbano / Manual de desenho bioclimático urbano*.

- Feitosa, S. M. R., Gomes, J. M. A., Neto, J. M. M., & Andrade, C. S. P. (2011). Consequências da urbanização na vegetação e na temperatura da superfície de Teresina–Piauí. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 6(2), 58–75.
- Frota, A. B., & Shiffer, S. R. (2003). *Manual de conforto térmico*. Editora Nobel.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in urban and building design*. John Wiley & Sons.
- Gomes, M. A. S., & Amorim, M. C. C. T. (2003). Arborização e conforto térmico no espaço urbano: Estudo de caso nas praças públicas de Presidente Prudente – SP. *Caminhos de Geografia*, 7, 94–106.
- Gondim, A., et al. (2023). ENVI-met model sensitivity to wind direction data. *Advances in Science and Research*, 20(1), 65–72. <https://doi.org/10.5194/asr-20-65-2023>
- Gusson, C. S. (2014). *Efeito da densidade construída sobre o microclima urbano: Construção de diferentes cenários possíveis e seus efeitos no microclima para a cidade de São Paulo, SP* (Dissertação de mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- Huttner, S., & Bruse, M. (2009). Numerical modeling of the urban microclimate — A study on ENVI-met. *Meteorologische Zeitschrift*, 18(2), 137–149.
- Instituto Politécnico de Bragança. (1983/2025). *Instituição – Sobre o IPB*. Instituto Politécnico de Bragança. Recuperado em 21 de janeiro de 2025
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2025). Normais climatológicas de Bragança (1991–2020). Dados climatológicos.
- International Organization for Standardization. (1998). *ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment: Instruments for measuring physical quantities*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2005). *ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. ISO.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability – Regional aspects*. Cambridge University Press.
- Johansson, E. (2006). *Urban design and outdoor thermal comfort in warm climates: Studies in Fez and Colombo*. Grahns Tryckeri AB.

Johansson, E. D. O. (2009). *Climate conscious architecture and urban design in Jordan towards energy efficient buildings*. Swedish International Development Cooperation Agency.

Kobiyama, M., & Manfroi, O. J. (1999). Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas. In *Curso de extensão: O manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal*. UFPR.

Lago Lima, R. E. (2022). *Fachadas verdes e simulação microclimática com ENVI-met* (Dissertação de mestrado, Universidade do Minho). Universidade do Minho.

Lau, K. K. L., Zhong, T., Gou, Z., & Lai, X. (2018). Defining the environmental performance of neighbourhoods in high-density cities. *Building Research & Information*, 46(5), 540–551.

Li, J., Zhang, Y., Wang, X., & Zhao, L. (2022). A review of urban microclimate research: Progress, challenges, and perspectives. *Buildings*, 12(6), 808.

Liu, Z., Zhang, Y., Wang, X., & Zhao, L. (2023). A review of thermal comfort evaluation and improvement strategies in urban outdoor spaces. *Buildings*, 13(12), 3050.

Madureira, C. M. N. (1992). A metodologia sistémica. *Geo-Sistemas*, 1, 21–35.

Malaguerra, R. I. P. (2021). *Conforto térmico exterior em zonas urbanas: Contributos de levantamentos expeditos na pré-avaliação de ações* (Tese de doutorado, Universidade de Coimbra).

Matheus, C., et al. (2016). Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro. *Ambiente Construído*, 16(1), 71–81.

Mendonça, F., & Monteiro, C. A. D. F. (2003). *Clima urbano*. Editora Contexto.

Milano, M. S., & Dalcin, E. C. (2000). *Arborização de vias públicas* (226 p.). Light.

Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C. A., & Guhathakurta, S. (2014). Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 122, 16–28.

Minella, F. C. O., Mota, L. T., Souza, L. C. L., & Vecchia, F. A. S. (2012). Estratégias de melhoria do ambiente térmico diurno em espaços urbanos: Efeitos do albedo e da arborização. *Ambiente Construído*, 12(3), 139–155.

Moin, U. M., & Tsutsumi, J. (2004). Rapid estimation of sky view factor and its application to human environment. *Journal of the Human-Environment System*, 7(2), 83–87.

Monteiro, C. A. F. (1976). *Teoria e clima urbano* (Tese de livre-docência). Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo.

Monteiro, L. M. (2008). *Modelos preditivos de conforto térmico: Quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos* (Tese de doutorado, Universidade de São Paulo). Universidade de São Paulo.

Ndetto, E. L., Opiyo, G. S., & Matzarakis, A. (2023). Investigation of the ENVI-met model sensitivity to different domain sizes and grid configurations. *Advances in Science and Research*, 20, 65–78. <https://doi.org/10.5194/asr-20-65-2023>

Ng, E. (2009). Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – Air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and Environment*, 44(7), 1478–1488.

Ng, E. (2016). Urban air ventilation in high-density cities in the tropics. In R. Emmanuel (Ed.), *Urban climate challenges in the tropics: Rethinking planning and design opportunities* (pp. 79–110). Imperial College Press.

Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., & Fung, J. C. H. (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 101(1), 59–74.

Nguyen, A. T., & Reiter, S. (2021). Verifying ENVI-met simulation of thermal environment for urban settlements in hot climates. *Building and Environment*, 206, 108352.

Nicol, F., Humphreys, M., Sykes, O., & Roaf, S. (1995). *Standards for thermal comfort: Indoor air temperature standards for the 21st century*. E & FN Spon.

Nikolopoulou, M., & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35, 95–101.

Nóbrega, R. S., & Lemos, T. V. da S. (2011). The microclimate and thermal (dis)comfort in open environments in Recife city.

- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138.
- Oke, T. R. (1978). *Boundary layer climate* (2nd ed.). Methuen.
- Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(1/4), 237–254.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1–24.
- Oke, T. R. (1984). Methods in urban climatology. In *Applied climatology (Zürcher Geographische Schriften*, No. 14, pp. 19–29).
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Routledge.
- Oke, T. R. (1989). The micrometeorology of the urban forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 324(1223), 335–348.
- Oke, T. R. (1997). Urban environments. In W. G. Bailey, T. R. Oke, & W. R. Rouse (Eds.), *Surface climates of Canada* (pp. 303–327). McGill-Queen's University Press.
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Olgay, V. (1963). *Design with climate*. Princeton University Press.
- Oliveira, P. M. P. de. (1988). *Cidade apropriada ao clima: A forma urbana como instrumento de controle do clima urbano* (Tese de mestrado, Universidade de Brasília). Universidade de Brasília.
- Paiva, J. P. M. (2010). *Análise microclimática em conjuntos habitacionais: O caso do Conjunto Ceará – Fortaleza/CE* (Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Ceará). Universidade Estadual do Ceará.
- Pascoalino, A., & Marandola Júnior, E. (2021). A vulnerabilidade na cidade e as escalas do clima urbano: O potencial das unidades climáticas para o planejamento. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(5).
- Ribeiro, A. G. (1993). As escalas do clima. *Boletim de Geografia Teórica*, 23(45–46), 288–294.

- Romero, M. A. B. (2001). *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. Pro Editores.
- Romero, M. A. B. (2007). *Arquitetura bioclimática do espaço público*. Editora da Universidade de Brasília.
- Romero, M. A. B. (2011). Correlação entre o microclima e a configuração do espaço residencial de Brasília. *Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, 5, 9–22.
- Romero, M. A. B. (2015). *Arquitetura bioclimática do espaço público* (4ª ed.). Editora Universidade de Brasília.
- Rossi, F. A., Krüger, E. L., & Guimarães, I. A. (2013). Predictive model of thermal sensation for open spaces in Curitiba, PR [Artigo não publicado].
- Ruas, A. C. (1999). *Contribuição à aplicação prática das normas internacionais de conforto térmico* [Tese ou dissertação]. Campinas, SP.
- Sailor, D. J. (1995). Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover. *Journal of Applied Meteorology*, 34(7), 1694–1704.
- Salata, F., Golasi, I., Petitti, D., de Lieto Vollaro, E., Coppi, M., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Relating microclimate, human thermal comfort and urban heat island effect: A numerical analysis. *Energy and Buildings*, 114, 16–28.
- Santos, B. F. (2016). *Urbanização e clima urbano do bairro Atalaia na cidade de Aracaju/SE* [Dissertação de mestrado]. Universidade Federal de Sergipe.
- Santos, L. B. S. (2024). *Simulação microclimática com o ENVI-met para o estudo da Praça Camões em Bragança (Portugal)* (Dissertação de mestrado). Escola Superior Agrária de Bragança, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768.
- Sezer, N., Koç, M., & Güvenç, U. (2023). Urban microclimate and building energy models: A review of coupling strategies and future directions. *Building and Environment*, 231, 109936.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2011). The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1498–1506.
- Silva, C. F. E., & Romero, M. A. B. (2009). O desempenho ambiental de vias arborizadas na cidade de Teresina por meio de dados sensoriais, microclimáticos e

simulações computacionais com o auxílio do ENVI-met. In *X Encontro Nacional e VII Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído (X ENCAC)* (pp. 573–582).

Simon, H., et al. (2003). Use and evaluation of the ENVI-met model for two different urban structures. In *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference*. International Cartographic Association.

Skubs, D. (2009). *O conforto térmico nos espaços de transição e sua influência como elemento apaziguador do microclima local* [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual de Campinas]. Universidade Estadual de Campinas.

Souza, L. C. L., Rodrigues, D. S., & Mendes, J. F. G. (2003). Expandindo um SIG-D para aplicação em conforto ambiental em nível urbano. In *VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e III Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações* (pp. 669–676). ANTAC.

SpringerOpen. (2016). Transforming typical hourly simulation weather data files to enable urban heat island studies. *Future Cities and Environment*, 2(1), 1–16.

Teza, C. T. V., & Baptista, G. M. de M. (2005). Identificação do fenômeno ilhas urbanas de calor por meio de dados ASTER on demand 08 – Kinetic Temperature (III): metrópoles brasileiras. In *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (pp. 3911–3918).

Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1613–1640.

Vilela, J. A. (2007). *Variáveis do clima urbano: Análise da situação atual e prognósticos para a região do bairro Belvedere III, Belo Horizonte* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais]. Universidade Federal de Minas Gerais.

Wang, C., Wang, Z., & Ryu, Y. (2021). A single-layer urban canopy model with transmissive radiation exchange between trees and street canyons. *Building and Environment*, 191, 107593.

Ward, H. C., & Grimmond, C. S. B. (2017). Assessing the impact of changes in surface cover, human behaviour and climate on energy partitioning across greater London. *Landscape and Urban Planning*, 165, 142–161.

Watanabe, S., & Horikoshi, T. (2012). Calculation of mean radiant temperature in outdoors based on measurements. *Japanese Journal of Biometeorology*, 49(2), 49–59.

Yahia, M. W., Johansson, E., Thorsson, S., Lindberg, F., & Rasmussen, M. I. (2017). Effect of urban design on microclimate and thermal comfort outdoors in warm-humid Dar es Salaam, Tanzania. *International Journal of Biometeorology*, 62(3), 373–385.

Zakšek, K., Oštir, K., & Kokalj, Ž. (2011). Sky-View Factor as a relief visualization technique. *Remote Sensing*, 3, 398–415.

ANEXO

ANEXO A: Modelo dos questionários validados pela Comissão Ética do IPB que foram aplicados na pesquisa.



Conforto Térmico na Praça José Adriano (IPB)

Informações Gerais

Local: _____ Data e hora: _____ Número: _____ Idade: _____ Altura: _____
Peso: _____ Género: Masculino Feminino País de Origem: _____
Nível de atividade: _____ Última refeição: _____

Avaliação Conforto Térmico

2.2 Circulação de Ar (Preencha com X).

Classificação	
Muito Vento (+2)	
Vento Moderado (+1)	
Bom (0)	
Calmo (-1)	
Muito Calmo (-2)	

2.3 Humidade (Preencha com X).

Classificação	
Muito Húmido (+2)	
Húmido (+1)	
Razoavelmente Húmido (0)	
Seco (-1)	
Muito Seco (-2)	

2.5 Como descreveria o que lhe causa incomodidade térmica? (Preencha com X).

Muita Humidade	
Muito Seco	
Muita Circulação de Ar	
Baixa Circulação de Ar	
Incidência do Sol	
Superfícies	
Luminosidade	

2.1 Sensação Térmica (Preencha com X).

Classificação	
Muito Quente (+3)	
Quente (+2)	
Temperado (+1)	
Neutro (0)	
Fresco (-1)	
Frio (-2)	
Muito Frio (-3)	

2.4 Como gostaria de se sentir, neste momento, neste local? (Preencha com um X).

Muito Mais Calor (+3)	
Mais Calor (+2)	
Um Pouco Mais de Calor (+1)	
Como Está Neste Momento (0)	
Um Pouco Mais de Frio (-1)	
Mais Frio (-2)	
Muito Mais Frio (-3)	

2.6 Que temperatura pensa estar agora? ____

2.7 Como está vestido? (Preencha com X).

__ Camisola de manga comprida __ Calças de treino __ Sapato com sola grossa
__ Camisola de manga curta (T-shirt) __ Calções __ Botas
__ Camisa de manga comprida __ Saia curta __ Sandálias abertas
__ Camisa de manga curta __ Saia longa __ Sandálias fechadas
__ Casaco __ Vestido curto __ Chinelos
__ Máscara __ Vestido longo Outros: _____
__ Calças de ganga __ Sapato com sola fina

Obrigado pela sua contribuição!