

Simulação Microclimática Com o ENVI-met Para o Estudo da Praça Camões em Bragança (Portugal)

Lucas Borges Silva Santos

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança
para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no
âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica
Federal do Paraná*

Orientado por

Artur Jorge de Jesus Gonçalves

Sueli Tavares de Melo Souza

**Bragança
2024**



Lucas Borges Silva Santos

Simulação Microclimática Com o ENVI-met Para o Estudo da Praça Camões em Bragança (Portugal)

**Bragança
2024**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, que me fortaleceu em toda a minha caminhada. Aos meu pais, Renaldo e Cleonice, que nunca mediram esforços para me apoiar, encorajar e permitir que eu enfrentasse oportunidades como esta. Ao meu irmão, Eduardo, que sempre esteve presente, mesmo à distância. E à minha namorada, Beatriz, que caminhou ao meu lado, sempre me apoiando e superando barreiras em parceria.

Deixo aqui minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Artur Jorge de Jesus Gonçalves, pela orientação nesse período, pela paciência e pelas conversas que me fizeram ter uma evolução pessoal e acadêmica. À minha coorientadora Profa. Dra. Sueli Tavares de Melo Souza, que desde o início me incentivou a encarar essa jornada e sempre esteve presente para me auxiliar. À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Londrina e ao Instituto Politécnico de Bragança, pela oportunidade de realizar o programa de Dupla Diplomação.

Agradeço à minha família e meus amigos do Brasil que de alguma forma estiveram presentes comigo até aqui, e aos meus amigos de Bragança, que tornaram o processo do Mestrado mais tranquilo e me fizeram colecionar inúmeras lembranças que levarei comigo para o resto da vida.

Quero dizer um muito obrigado a todos os companheiros de apartamento que tive, em especial aos meus primeiros amigos do 2DT, Gustavo, Hugo e Pedro, que estiveram comigo nos momentos mais difíceis que passei aqui, e que, com boas conversas e momentos, ajudaram a tornar tudo mais fácil.

Por fim, quero também deixar um agradecimento a todos que estiveram envolvidos e me apoiaram na realização da minha dissertação, desde o suporte com as ferramentas que utilizei até o apoio nos trabalhos de campo que precisei realizar. Todos foram importantes nessa grande trajetória.

RESUMO

As mudanças resultantes do crescimento populacional e da expansão urbana têm impactos ambientais agravados pelas contínuas e inúmeras transformações do espaço. Estas alterações ambientais podem envolver as mudanças do clima, estresse bioclimático, alterações nos fluxos dos ventos e na precipitação das chuvas. Assim, a cidade cria seu próprio microclima, resultado da interação de diversos fatores que afetam a paisagem urbana e modificam o clima em nível local. As preocupações com o clima vêm se intensificando, sendo evidente a evolução de tecnologias que buscam criar cenários e modelos matemáticos, bem como a necessidade de desenvolver trabalhos sobre a gestão do ambiente urbano e seu impacto na saúde pública, contribuindo também para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o objetivo 11. Considerando esses fatores, este estudo tem como objetivo avaliar as condições microclimáticas em uma área central da cidade de Bragança, especificamente na Praça Camões, e estimar os benefícios decorrentes da implementação de Soluções Baseadas na Natureza (SBNs), utilizando o software ENVI-Met. A metodologia iniciou com a caracterização da área de estudo e do clima local. Em seguida, foram realizadas medições de dados climáticos em três dias diferentes (22/03/2024, 15/04/2024 e 17/07/2024), utilizando bases microclimáticas. Esses dados serviram como entrada e validação para o modelo. Também foram coletadas informações espaciais, sobre a cobertura vegetal e o tipo de solo para a construção do modelo 3D. Nos mesmos dias, foram aplicados questionários para avaliar e compreender o conforto térmico local. Com essas informações, o cenário base e o cenário alternativo foram modelados e as simulações executadas. Os dados gerados a partir da simulação indicam uma certa correlação com os dados coletados pelas bases microclimáticas, o comportamento é semelhante, apresentando apenas um leve desvio. As diferenças de Temperatura do ar (T_a) e Temperatura Média Radiante (T_{mr}) entre os cenários indicam que as SBNs que foram introduzidas no cenário alternativo surtiram um bom efeito, principalmente com as novas sombras que foram projetadas.

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

ABSTRACT

The changes resulting from population growth and urban expansion have environmental impacts exacerbated by the continuous and numerous transformations of space. These environmental alterations can involve climate changes, bioclimatic stress, changes in wind flows, and rainfall patterns. Thus, the city creates its own microclimate, as a result from the interaction of various factors that affect the urban landscape and modify the climate at a local level. There have been increasing concerns about the climate, as evidenced by the development of technologies that aim to create scenarios and mathematical models, as well as the need to conduct studies on urban environment management and its impact on public health. This also contributes to fulfilling the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly goal 11. In this context, this study aims to evaluate the microclimatic conditions in a central area of the city of Bragança, specifically in Praça Camões, and to estimate the benefits of implementing Nature-Based Solutions (NBS), using ENVI-Met software. The methodology began with characterizing the study area and the local climate. Then, climate data measurements were taken on three different days (March 22, 2024, April 15, 2024, and July 17, 2024), using microclimatic databases. These data served as inputs and validation for the model. Spatial information on vegetation cover and soil type was also collected to construct the 3D model. On the same days, questionnaires were administered to assess and understand local thermal comfort. With this information, the real and alternative scenarios were modeled, and simulations were executed. The data generated from the simulation indicate a certain correlation with the data collected from microclimatic databases; the behavior is similar, showing only a slight deviation. The differences in Air Temperature (T_a) and Mean Radiant Temperature (T_{mr}) between the scenarios indicate that the NBS introduced in the alternative scenario had a positive effect, mainly due to the new shaded areas that were projected.

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

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS	XII
1 INTRODUÇÃO	1
2 O USO DA SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE MICROCLIMA	3
2.1 CLIMA URBANO	3
2.1.1 Escalas.....	4
2.2 MICROCLIMA.....	6
2.2.1 Materiais.....	7
2.2.2 Vegetação	9
2.2.3 Edifícios	10
2.2.4 Fator de Visão de Céu	11
2.3 CONFORTO TÉRMICO	11
2.3.1 Carta bioclimática de Olgyay	13
2.4 SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA	14
2.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....	15
2.5.1 Representação de formas de modelagem	15
2.6 ENVI-met.....	16
3 MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	18
3.2 CLIMA DA REGIÃO	19
3.3 MEDIÇÕES DE DADOS E MONITORIZAÇÃO CLIMÁTICA.....	20
3.3.1 Período de medição	23

3.4 MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS ESPACIAIS	25
3.4.1 Dimensionamento dos edifícios.....	25
3.4.2 Levantamento dos dados das árvores.....	26
3.4.3 Classificação do tipo de solo e superfície	27
3.5 INQUÉRITOS.....	28
3.6 SIMULAÇÕES NO ENVI-MET	29
3.7 CENÁRIOS	31
3.7.1 Cenário base	31
3.7.2 Cenário alternativo	32
3.8 PROCESSAMENTO DE DADOS	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 ANÁLISE DOS DADOS MEDIDOS PELAS ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS	36
4.1.1 Temperatura do ar.....	36
4.1.2 Temperatura Média Radiante	40
4.1.3 Humidade relativa e Velocidade do ar	45
4.1.4 Correlação de dados.....	48
4.2 ANÁLISE DOS QUESTIONÁRIOS	51
4.2.1 Análises estatísticas	51
4.2.2 Comportamento das variáveis.....	56
4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	58
4.3.1 Cenário base simulado.....	58
4.3.2 Cenário alternativo simulado.....	59
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE A MONITORIZAÇÃO E OS CENÁRIOS SIMULADOS.....	60
4.4.1 Comparações para o dia 22 de março de 2024	60
4.4.2 Comparações para o dia 15 de abril de 2024.....	65
4.4.3 Comparações para o dia 17 de julho de 2024.....	69

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE O CENÁRIO BASE E ALTERNATIVO.....	74
4.5.1 Comparações para a Temperatura do ar.....	74
4.5.2 Comparações para a Temperatura Média Radiante	82
4.5.3 Cálculo do PMV (Predicted Mean Vote – Voto Médio Estimado)	90
5 CONCLUSÃO.....	93
BIBLIOGRAFIA.....	95
ANEXO.....	103
ANEXO A: Modelo dos questionários validados pela Comissão Ética do IPB que foram aplicados na pesquisa.....	103
ANEXO B: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário base no primeiro dia.	104
ANEXO C: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário base no segundo dia.	105
ANEXO D: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário base no terceiro dia.	106
ANEXO E: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo no primeiro dia.	107
ANEXO F: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo no segundo dia.	108
ANEXO G: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo no terceiro dia.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ordens de Grandeza sintetizadas por Ribeiro.....	6
Tabela 2 – Resumo de albedo para diferentes materiais medidos.....	8
Tabela 3 – Níveis de classificação para o PMV (Predicted Mean Vote).....	13
Tabela 4 – Perguntas para a avaliação sobre a percepção do conforto térmico.	29
Tabela 5 - Dados meteorológicos utilizados para simulação do software ENVI-Met. .	31
Tabela 6 – Representação da classificação em relação ao coeficiente de correlação....	35
Tabela 7 – Matriz de correlação de Pearson para os valores Temperatura do ar no dia 22 de março de 2024.....	48
Tabela 8 - Matriz de correlação de Pearson para os valores Temperatura do ar no dia 15 de abril de 2024.	49
Tabela 9 - Matriz de correlação de Pearson para os valores Temperatura do ar no dia 17 de julho de 2024.	49
Tabela 10 – Matriz de correlação de Pearson para os valores de Temperatura média radiante no dia 22 de março de 2024.....	49
Tabela 11 - Matriz de correlação de Pearson para os valores de Temperatura Média Radiante no dia 15 de abril de 2024.	50
Tabela 12 - Matriz de correlação de Pearson para os valores de Temperatura Média Radiante no dia 17 de julho de 2024.	50
Tabela 13 – Distribuição das variáveis para aplicação do teste de Kruskal-wallis.	52
Tabela 14 – Matriz de correlação Pearson entre os dados medidos (T_a (M)) e os dados simulados no ENVI-met (T_a (CB)) para o cenário base para cada ponto para o dia 22/03/2024.....	62
Tabela 15 – Diferença da Temperatura do ar entre o medido (M) e cenário base (CB) para o dia 22/03/2024.	63
Tabela 16 - Diferença da Temperatura Média Radiante entre o medido (M) e cenário base (CB) para o dia 22/03/2024.	64
Tabela 17 - Matriz de correlação Pearson entre os dados medidos (T_a (M)) e os dados simulados no ENVI-met (T_a (CB)) para cada ponto para o dia 15/04/2024.....	67
Tabela 18 - Diferença da Temperatura do ar entre o medido (M), cenário base (CB) para o dia 15/04/2024.	68
Tabela 19 - Diferença da Temperatura Média Radiante entre o medido (M), cenário base (CB) para o dia 15/04/2024.	69

Tabela 20 - Matriz de correlação Pearson entre os dados medidos (Ta (M)) e os dados simulados no ENVI-met (Ta (CB)) para cada ponto para o dia 17/07/2024.....	71
Tabela 21 - Diferença da Temperatura do ar entre o medido (M) e cenário base (CB) para o dia 17/07/2024.	72
Tabela 22 - Diferença da Temperatura Média Radiante entre o medido (M) e cenário base (CB) para o dia 17/07/2024.	73
Tabela 23 – Dados usados para a realização do cálculo do predicted mean vote (PMV).....	91
Tabela 24 – Resultados após a realização dos cálculos para o predicted mean vote (PMV).....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Dimensões espacial e temporal dos processos atmosféricos, e área relevante para os fenómenos urbanos.	5
Figura 2.2 – Qualidade ecológica das árvores.....	10
Figura 2.3 – Carta Bioclimática de Olgyay.	14
Figura 3.1 – Mapa de localização da Praça Camões.	18
Figura 3.2 – Normal Climatológica,1981-2010, de Precipitação disponibilizada pelo IPMA.	20
Figura 3.3 – Normal Climatológica, 1981-2010, de Temperatura do ar disponibilizada pelo IPMA.	20
Figura 3.4 - Registradores de dados de microclima térmico – Datalogger, Delta Ohm 32.1 (Esquerda) e Delta Ohm 32.3 (Direita).	22
Figura 3.5 – Registrador de dados de microclima térmico - Sensor TinyTag.....	22
Figura 3.6 – Mapa com os pontos de monitoramento.	24
Figura 3.7 – Medidor a laser LB 500 STABILA.....	25
Figura 3.8 – Árvores registradas durante o verão (esquerda) e inverno (direita).....	26
Figura 3.9 – Condições do solo.	27
Figura 3.10 – Representação 3D do cenário base.....	32
Figura 3.11 – Representação 3D do cenário alternativo.....	33
Figura 4.1 – Evolução da Temperatura do Ar durante o dia 22 de março de 2024.....	37
Figura 4.2 – Evolução da Temperatura do Ar durante o dia 15 de abril de 2024.	38
Figura 4.3 - Evolução da Temperatura do Ar durante o dia 17 de Julho de 2024.....	39
Figura 4.4 – Evolução da Temperatura Média Radiante durante o dia 22 de março de 2024.	41
Figura 4.5 – Evolução da Temperatura Média Radiante durante o dia 15 de abril de 2024.	42
Figura 4.6 - Evolução da Temperatura Média Radiante durante o dia 17 de julho de 2024.	44
Figura 4.7 – Comportamento da Humidade Relativa durante os três dias de medição.	46
Figura 4.8 – Comportamento da Velocidade do ar durante os três dias de medição. ...	47
Figura 4.9 – Representação diagrama de caixas para a Temperatura do ar no local e a Sensação térmica.	53

Figura 4.10 – Representação diagrama de caixas entre a Humidade relativa do local e a Sensação térmica.	54
Figura 4.11 – Representação diagrama de caixas da Temperatura do ar real e a percepção de Humidade.....	55
Figura 4.12 – Comportamento da percepção de Sensação térmica ao longo do dia, nos três dias de medição.....	57
Figuras 4.13 - Evolução da Temperatura do ar nos períodos de medição, para os pontos medidos, e os resultantes da simulação do cenário base e do cenário alternativo no dia 22 de março de 2024.....	61
Figura 4.14 – Evolução da Temperatura do ar nos períodos de medição, para os pontos medidos, e os resultantes da simulação do cenário base e do cenário alternativo no dia 15 de abril de 2024.	66
Figura 4.15 - Evolução da Temperatura do ar nos períodos de medição, para os pontos medidos, e os resultantes da simulação do cenário base e do cenário alternativo no dia 17 de julho de 2024.	70
Figura 4.16 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 9 horas do dia 22 de março de 2024.....	75
Figura 4.17 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 15 horas do dia 22 de março de 2024.....	76
Figura 4.18 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 18 horas do dia 22 de março de 2024.....	77
Figura 4.19 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 9 horas do dia 15 de abril de 2024.....	78
Figura 4.20 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 15 horas do dia 15 de abril de 2024.....	79
Figura 4.21 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 19 horas do dia 15 de abril de 2024.....	79
Figura 4.22 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 10 horas do dia 17 de julho de 2024.....	80
Figura 4.23 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 16 horas do dia 17 de julho de 2024.....	81
Figura 4.24 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 20 horas do dia 17 de julho de 2024.....	81

Figura 4.25 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 9 horas do dia 22 de março de 2024	83
Figura 4.26 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 15 horas do dia 22 de março de 2024.	84
Figura 4.27 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 18 horas do dia 22 de março de 2024.	85
Figura 4.28 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 9 horas do dia 15 de abril de 2024.	86
Figura 4.29 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 15 horas do dia 15 de abril de 2024.	87
Figura 4.30 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 19 horas do dia 15 de abril de 2024.	87
Figura 4.31 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 10 horas do dia 17 de julho de 2024.	88
Figura 4.32 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 16 horas do dia 17 de julho de 2024.	89
Figura 4.33 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 20 horas do dia 17 de julho de 2024.	89

LISTA DE ABREVIATURAS

CA	Cenário Alternativo
CB	Cenário Base
CO ₂	Dióxido de Carbono
EU	União Europeia
FVC	Fator de Visão de Céu
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
M	Dados Medidos pela Monitorização Microclimática
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PMV	Predicted Mean Vote
HR	Humidade Relativa
SBNs	Soluções Baseadas na Natureza
Ta	Temperatura do Ar
Tmr	Temperatura Média Radiante
Va	Velocidade do ar
UTC	Coordinated Universal Time – Tempo Universal Coordenado

1 INTRODUÇÃO

As mudanças resultantes do crescimento populacional e da expansão urbana têm impactos ambientais agravados pelas contínuas e inúmeras transformações do espaço, resultando em um desequilíbrio nos ecossistemas e nas interações entre a atmosfera e a superfície terrestre. A constante evolução na configuração do ambiente construído, influenciada por diversas formas de ocupação do solo, modifica os padrões meteorológicos, fazendo com que ocorram alterações no clima, originando microclimas distintos. Estes desequilíbrios são ocasionados pela impermeabilização do solo, pela presença de materiais urbanos que conduzem calor, pela poluição do ar, pelo aumento da urbanização e, sobretudo, pela diminuição da cobertura vegetal (Feitosa, 2011).

As alterações ambientais que são reflexos do processo de expansão, podem envolver diversas situações, onde algumas delas são as mudanças do clima, estresse bioclimático, alterações nos fluxos dos ventos e na precipitação das chuvas. Essas alterações, por sua vez, se evidenciam na atmosfera local, afetando a saúde humana, danificando edifícios e ocasionado o aumento do consumo de energia através da necessidade da climatização artificial (Assis, 2006).

Neste contexto, a cidade cria seu próprio microclima, resultado da interação de diversos fatores que afetam a paisagem urbana e modificam o clima em nível local. A qualidade do ar, o efeito das chuvas e o conforto térmico são os impactos mais perceptíveis para a população (Monteiro, 1976). Com isso, ocorrem mudanças nas características originais da região e, como consequência o microclima urbano local são um reflexo direto do intenso processo de ocupação das áreas urbanas (Nascimento, 2011).

Ao longo do tempo ocorreram grandes preocupações com o clima, sendo evidente a evolução de estudos e pesquisas de tecnologias que buscam criar cenários e modelos matemáticos, e assim, promover ações para mudanças relacionadas as condições climáticas de cada região. Desde 1970, dados de satélite têm sido utilizado para a obtenção de temperatura na terra e na geração de índices de vegetação, como é o caso do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). O NDVI, por sua vez, mapeia a vegetação com base nos valores dos pixels, oferecendo suporte para analisar as mudanças na cobertura vegetal em relação à temperatura na superfície terrestre (Orhan, 2014).

Além disso, a escolha do tema está relacionada ao interesse e à necessidade de desenvolver trabalhos sobre a gestão do ambiente urbano e seu impacto na saúde pública.

A criação de modelos microclimáticos é fundamental para avaliar o conforto térmico externo na área de estudo, permitindo propor cenários alternativos que busquem sua melhoria. Esses estudos também contribuem para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o 3 “*Boa Saúde e Bem-Estar*”, 13 “*Combate as Alterações Climáticas*”, 15 “*Vida Sobre a Terra*” e em especial o objetivo 11, que visa “*Tornar as Cidades e Comunidades Inclusivas, Seguras, Resilientes e Sustentáveis*”.

Considerando o contexto relacionado ao clima urbano, este estudo tem como objetivo avaliar as condições microclimáticas em uma área central da cidade de Bragança, especificamente na Praça Camões, e estimar os benefícios decorrentes da implementação de Soluções Baseadas na Natureza (SBNs), utilizando o software ENVI-Met. Para isso, foi necessário compreender as características do ambiente urbano, incluindo edifícios, superfícies e vegetação, por meio de levantamentos e modelagem 3D, para realizar simulações em diferentes condições climáticas. A solução tem como base aspectos de vegetação, assim, colaborando para uma melhoria na qualidade de vida e de ambiente na região, proporcionando bem-estar social, econômico e ambiental. Diante disso, o trabalho foi dividido da seguinte forma: referencial teórico, materiais e métodos, resultados e discussões e conclusão.

O referencial teórico está relacionado ao tema do uso de simulação para o estudo do microclima urbano, sendo ele descrito da seguinte forma: caracterização do clima urbano, exemplificando as condições e variáveis; microclima, onde se fala das condições climáticas presentes em uma pequena área, levando em consideração influência da vegetação, edifícios e conforto térmico; modelagem, que abrange tanto o conceito de modelação quanto a modelagem de sistemas ambientais.

Os materiais e métodos têm como objetivo apresentar a área de estudo e suas características, além de descrever os equipamentos utilizados para a coleta de dados. Será detalhado o uso do software e a entrada de dados nele. Por fim, serão apresentados os cenários aplicados no modelo e a análise do conforto térmico.

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos da simulação através dos cenários modelados, incluindo os dados meteorológicos e suas validações. Assim, é possível entender e analisar as características microclimáticas da região, bem como os potenciais benefícios da implementação de soluções baseadas na natureza.

Finalmente, na conclusão são apresentados um resumo e uma reflexão dos resultados, identificando possíveis projeções para o futuro.

2 O USO DA SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE MICROCLIMA

2.1 CLIMA URBANO

O clima desempenha um papel crucial em diversos processos que ocorrem no nosso planeta, influenciando as paisagens, a diversidade biológica, os tipos de construção e os hábitos e costumes humanos. Ao longo da história, o ser humano tem se empenhado em desenvolver atividades para melhorar as condições de habitação, buscando constantemente maior conforto por meio de infraestruturas mais modernas, o que impacta tanto o meio construído quanto o natural. Em muitos casos, o ambiente climático e geográfico está diretamente relacionado com as interações entre sociedade e meio ambiente, e pode ser analisada através da arquitetura local. Com isso, a harmonia e adaptação do ser humano ao seu ambiente, desde sua construção até suas expressões sociais e culturais, são evidenciadas ao longo das gerações (Barbirato *et al.*, 2007).

O cenário atual é marcado pela urbanização. O crescimento das oportunidades disponíveis nos grandes centros urbanos leva muitas pessoas a se estabelecer nestes centros, impulsionando assim o desenvolvimento das atividades secundárias para satisfazer as necessidades da população. Esse fenômeno exerce uma influência direta na relação entre o clima e a urbanização. O aumento excessivo de certas atividades provoca alterações nas características do meio natural, resultando na formação do mesoclima e de microclimas e, também, ocasionando mudanças climáticas. Desta forma, o clima urbano refere-se a uma condição climática específica encontrada nas cidades, e é o resultado das alterações nos balanços de energia, massa e movimento causados pelas superfícies, materiais e atividades presentes nas áreas urbanas (Andrade, 2005).

Ainda no contexto de urbanização, a arquitetura de cada região apresenta suas características específicas para atender as necessidades do local com diversos tipos de edifícios, onde cada um possui sua peculiaridade de tamanho, altura, forma e materiais, o que dita seu tipo de interação com o meio em termos de carga térmica. O crescimento da construção horizontal e vertical são responsáveis pela supressão de grandes áreas com cobertura vegetal, afetando diretamente o clima local (Santos, 2016).

O clima urbano tem um impacto direto na saúde e no bem-estar dos seres humanos, sendo possível distinguir, nessa influência, fatores do conjunto do complexo ambiental, que são: qualidade do ar, radiação, vento, odores e ruídos (Andrade, 2005). Diante disso, é crucial compreender o papel do clima urbano no planejamento das cidades e na implementação de medidas de proteção, visando criar ambientes mais confortáveis, saudáveis e com menor consumo de energia (Ribeiro, 2016).

2.1.1 Escalas

Existem muitos autores que buscam entender e definir as escalas climáticas, Landsberg (1981), Ribeiro (1993), Oke (2004), Andrade (2005), que as classificam com intuito de facilitar a sua compreensão. Segundo Ribeiro (1993), a escala é uma referência de valor estabelecida de acordo com critérios relevantes para a compreensão de um fenômeno, onde os estudos dos fenômenos relacionados ao comportamento da atmosfera são direcionados para compreender sua extensão (espaço) e duração (tempo).

O clima é regido por esses conjuntos de fenômenos que se fundem no tempo e no espaço. Os fenômenos climáticos resultam de uma variedade de processos naturais que coexistem no mesmo tempo e espaço, interagindo através de trocas energéticas independentes e recíprocas. Cada escala de análise requer uma abordagem específica para garantir coerência entre a extensão e a duração do fenômeno climático, desde a coleta de dados até sua análise estatística e representação gráfica e cartográfica (Ribeiro, 1993).

A fim de simplificar e organizar a compreensão, foram criadas categorias distintas, embora arbitrárias e artificiais, para descrever os fenômenos atmosféricos, que são naturalmente contínuos (Oke, 1987). Os fenômenos foram categorizados em três escalas distintas: microescala, que abrange extensões de até 2 km; mesoescala, que varia de 2 a 2000 km; e macroescala, que engloba extensões acima de 2000 km (Orlansky, 1975).

Diversos autores discorrem sobre os princípios subjacentes ao funcionamento das dinâmicas dos fenômenos, de acordo com Wanner e Filliger (1989), em grandes áreas metropolitanas, os fenômenos urbanos ocorrem dentro de um intervalo de espaço e tempo que abrange tanto a microescala quanto a mesoescala. Essas definições também são válidas para Oke (1987 e 2004), que concebe as categorias como escalas verticais. A Figura 2.1 ilustra as distinções entre os fenômenos para facilitar a compreensão.

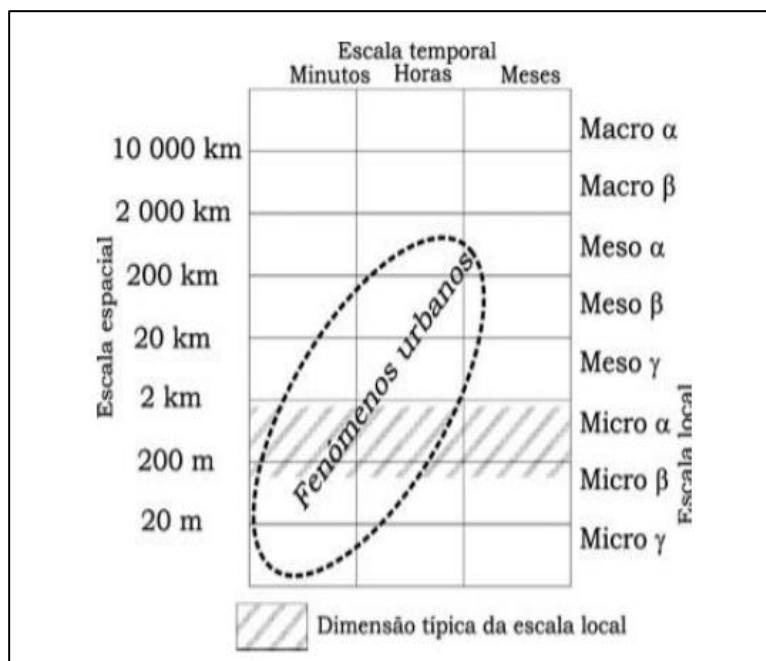


Figura 2.1 – Dimensões espacial e temporal dos processos atmosféricos, e área relevante para os fenômenos urbanos.

Na aplicação do conhecimento em estudos climáticos urbanos é crucial distinguir as escalas de forma mais precisa para se adequarem ao contexto local. Andrade (2003) fornece definições mais precisas sobre os conceitos relacionados às categorias das escalas, incluindo indicações específicas sobre as dimensões típicas associadas a cada uma delas, sendo assim:

- Microclima: Reflete a influência de elementos urbanos individuais e de suas disposições mais básicas, como edifícios e suas estruturas componentes, ruas, praças e pequenos jardins.
- Clima local: Clima de uma área com uma combinação de elementos, corresponde ao tipo de ocupação, solo e topografia.
- Mesoclima: Corresponde a influência integrada da cidade compreendendo vários climas locais, e podendo ter os mesmos efeitos da mesoescala.

Ribeiro (1993), apresenta ainda outras definições e novas subdivisões para uma compreensão aprimorada do clima urbano. Considerando os tipos e possibilidades de interação, são inicialmente identificados três níveis interativos que serão fundamentais para uma futura proposta taxonômica: nível macroclimático, nível mesoclimático e nível microclimático. O autor ainda continua pontuando os níveis das ordens das grandezas.

Desta forma, os critérios e níveis gerais anteriormente especificados, são apresentados seguindo ordens de grandeza espaço-temporal para os fenômenos climáticos: o clima zonal, o clima regional, o mesoclima ou clima local, o topo clima e o microclima. Ele resume as ordens de grandeza de acordo com o que é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Ordens de Grandeza sintetizadas por Ribeiro.

Ordem de grandeza	Definição	Extensão	Registros	Plano metodológico
Clima Zonal	Distribuição latitudinal da radiação solar, curvatura da superfície do planeta e a inclinação de seu eixo.	Horizontal: 1000 e 5000 km. Vertical: Abarcam a atmosfera.	Norma Climatológica - 30 anos de observação.	Contemplar o tratamento dos registros mencionados, em nível de atlas planisféricos.
Clima Regional	Distribuição latitudinal da radiação solar, curvatura da superfície do planeta e a inclinação de seu eixo.	Horizontal: 150 e 2500 km. Vertical: Limitados pela Tropopausa.	Análise de cartas sinóticas, imagens de satélite meteorológicos apoiados em estações climatológicas.	Interpretação do clima regional através de suas relações como os seus efeitos, no próprio espaço regional.
Clima Local	Variações com seu interior devido à ação de feições fisiográficas ou antrópicas interferindo no fluxo energético regional.	Horizontal: Variável, sem padrão. Vertical: 1200 e 2000 metros de altura.	Rede de observação meteorológica básica, estações termo pluviométricas ou postos pluviométricos.	Análise rítmica, correlação diária entre tipos de tempo e variação, e elementos climáticos.
Topoclima	Ampliar o gradiente horizontal, é uma derivação do clima local devido a rugosidade do terreno.	Horizontal: Restringe a forma do relevo e vertente (0,5 a 5 km). Vertical: 50 a 100 metros de altura.	Estações não convencionais, fixas ou móveis, automáticas e episódicas informando escala de horas.	O mapeamento das declividades e das exposições das vertentes, associado ao uso do solo fornece indicador com detalhamento de um clima local.
Microclima	Nível escalar mais próximo do indivíduo, define as trocas gasosas dispostas na superfície e envolvente.	Horizontal: 0,1 a 1000 metros. Vertical: Depende da natureza.	Aparelhos de alta sensibilidade e precisão, importante identificar variação no tempo em minutos.	Definição de mosaicos de microclimas controlados pela organização interna dos espaços agrícolas.

Fonte: Adaptado de Ribeiro (1993).

2.2 MICROCLIMA

Com base no contexto mencionado anteriormente, podemos observar que o microclima é uma escala que ocorre em uma área menor e é influenciado por diversos fatores relacionados com as infraestruturas, edifícios e atividades que ocorrem numa determinada zona, as quais estão diretamente relacionadas à formação do clima local. Os parâmetros do microclima urbano devem fornecer orientações sólidas e recomendações eficazes para garantir um conforto térmico ideal durante todas as estações do ano (Johansson, 2009).

A mudança na paisagem e as atividades relacionadas ao ambiente urbano vêm alterando o clima da cidade, afetando especialmente as condições climáticas ao redor dos edifícios e suas áreas próximas (Oke, 1987). Sendo assim, no ambiente urbano é evidente a maior concentração de atividades intensas e diversas trocas decorrentes dessas atividades são percebidas de maneira mais pronunciada.

Deste modo, os elementos que influenciam a mudança no comportamento do ar ao redor incluem a microrrugosidade, a cor e a textura das superfícies, assim como as edificações e a vegetação. Esses fatores afetam a intensidade das trocas de energia e de gases, o que acaba por modificar a circulação do ar na área circundante, assim como o clima local (Ribeiro, 1993).

2.2.1 Materiais

A estrutura do dossel urbano, que é o conjunto de atributos físicos das copas das árvores que se estendem sobre uma área urbana, criando uma cobertura similar a um telhado verde, e os materiais que compõem as superfícies das cidades são elementos essenciais na formação de microclimas variados em áreas abertas, influenciando o conforto térmico dos pedestres e o consumo energético dos edifícios (Chatzidimitriou, A., & Yannas, S., 2015).

Desta forma, o tipo de material presente na região, resultante da construção civil, influencia de alguma forma o balanço térmico, hídrico e suas trocas energéticas no sentido da capacidade de absorção, armazenagem e emissão de energia. Esses elementos são afetados por uma variedade de fatores, incluindo suas propriedades, tamanho, disposição no ambiente e configuração espacial. Essas influências ocorrem devido à radiação incidente, permeabilidade do material, textura, absorção e emissividade, albedo e inércia térmica (Tojo *et al.*, 2013).

Quando nos referimos ao albedo, que se trata do coeficiente de reflexão, é fundamental destacar que as características como cor do material determinam sua interação com o ambiente sob radiação solar, influenciando no aumento da temperatura local. Nesse sentido, é prudente escolher materiais que ofereçam melhor desempenho em diferentes contextos. Assim, ao buscar conforto no verão, é recomendado que se utilize materiais mais claros, com maior albedo, para evitar o acúmulo de calor na superfície (Tojo *et al.*, 2013).

Segundo Li *et al.* (2013), materiais que possuem coloração mais escura, como o asfalto, apresentam um albedo mais baixo (entre 0,08 e 0,09), o que os leva a absorver mais radiação e a gerar temperaturas mais elevadas. Em contrapartida, o concreto e a pavimentação apresentam albedo similares (entre 0,18 e 0,29, e entre 0,25 e 0,28, respectivamente), assim, refletem mais radiação devido ao albedo mais alto e tendem a manter temperaturas mais baixas, em comparação com o asfalto. A Tabela 2 representa classificação do albedo por superfície.

Tabela 2 – Resumo de albedo para diferentes materiais medidos.

Categoria de superfície	Tipo de permeabilidade	Número de testes	Albedo			
			Média	Max	Min	Des. Padrão
Pavimentação	Impermeável	40	0,28	0,29	0,24	0,01
Pavimentação	Permeável	40	0,25	0,29	0,22	0,02
Pavimentação	Permeável	33	0,28	0,29	0,25	0,01
Asfalto	Impermeável	58	0,09	0,1	0,07	0,01
Asfalto	Permeável	58	0,08	0,09	0,07	0,01
Asfalto	Permeável	33	0,08	0,1	0,07	0,01
Concreto	Impermeável	38	0,29	0,31	0,27	0,02
Concreto	Permeável	44	0,18	0,19	0,17	0,0
Concreto	Permeável	70	0,26	0,28	0,23	0,02

Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2013)

A inercia térmica é outro fator muito importante, principalmente quando falamos de balanço radioativo. Sendo assim, a inércia térmica refere-se à capacidade de uma massa de armazenar energia térmica e liberá-la gradualmente, dependendo de fatores como volume, densidade, calor específico e condutividade térmica do material. Nos materiais, essa propriedade permite que a energia solar recebida seja acumulada internamente, ajudando a evitar o aumento excessivo da temperatura do ar nos momentos de maior incidência. Em materiais sólidos, para que acumulem energia internamente, é necessário que recebam radiação direta, sendo que essa acumulação é mais eficiente em materiais com alto coeficiente de absorção e boa condutividade térmica. Sólidos fragmentados, como a gravilha, apresentam melhor capacidade de retenção de calor (Tojo *et al.*, 2013).

2.2.2 Vegetação

A vegetação é um dos elementos mais afetados pelo processo de urbanização e pelo crescimento populacional. A expansão das construções aumenta a supressão da vegetação, o que impacta fatores como o aumento da radiação direta, aumento da temperatura e alteração da ventilação, influenciando na formação das condições climáticas da região. Autores como Monteiro (1976), Romero (2001), Landsberg (1981), Mascaró (1996) e Sorre (2006), ao abordarem as mudanças climáticas causadas pela urbanização, atribuem à cidade a responsabilidade pelo aquecimento, principalmente devido à substituição da vegetação pela construção que provoca redução da umidade relativa do ar devido à drenagem ou impermeabilização de áreas húmidas.

As árvores atuam principalmente na projeção de sombras, que têm a capacidade de reduzir a radiação direta recebida por uma superfície, ou seja, interceptando a radiação. Desta forma, as árvores podem atenuar cerca de 38% da radiação solar disponível nos telhados dos edifícios e, também, contribuem para uma redução de 23% a 74% na radiação direta recebida durante os solstícios de verão e inverno, e uma redução entre 29% e 26% na radiação difusa (Tooke *et al.*, 2011).

Ainda neste contexto, as árvores intensificam o fluxo de calor latente através da evapotranspiração, o que contribui para o resfriamento do ambiente urbano, assim, reduzem a temperatura diurna por meio de sombreamento e transpiração (Wang *et al.*, 2021). Segundo Ryu *et al.* (2016), quando as árvores são incluídas, o fluxo de calor sensível diminui ao mesmo tempo em que o fluxo de calor latente aumenta.

Dessa forma, a presença de vegetação influencia de forma positiva nos ambientes. As árvores desempenham um papel importante na redução do calor em áreas urbanas, conservação de energia e fornecimento de sombra para residências individuais. Sua evapotranspiração contribui para diminuir as temperaturas urbanas. Além disso, elas absorvem som, água da chuva, filtram poluentes, reduzem a velocidade do ar e estabilizam o solo, prevenindo a erosão (Abreu, 2008). A figura 2 exemplifica de uma forma mais dinâmica esses processos citados.

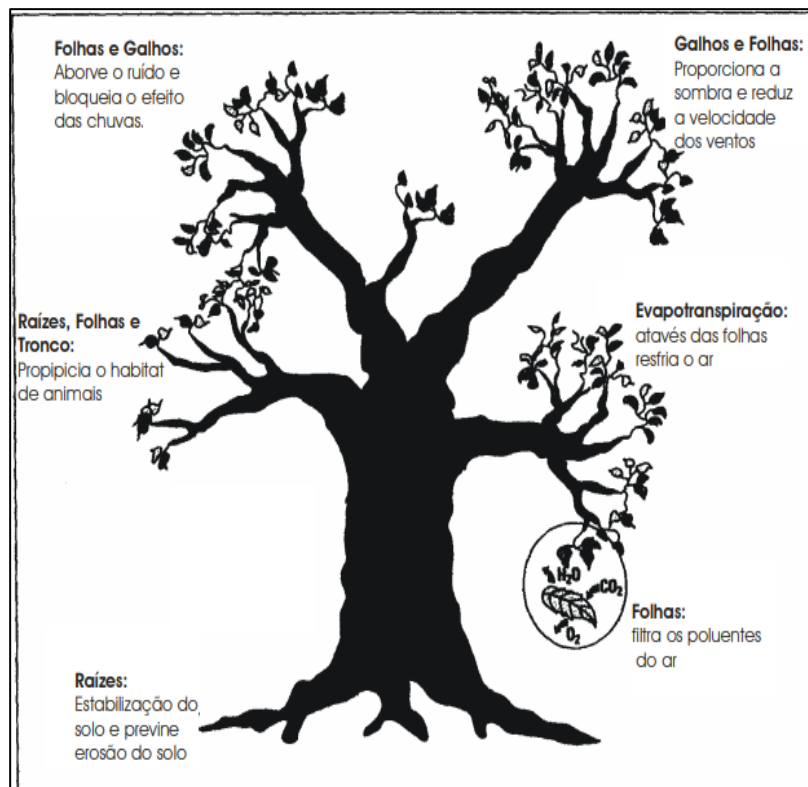


Figura 2.2 – Qualidade ecológica das árvores.

2.2.3 Edifícios

A maior parte do calor provém da radiação solar, a qual não se distribui uniformemente pela superfície. A quantidade e a disposição das construções, especialmente no caso dos edifícios, estão diretamente relacionadas à exposição à radiação. O tamanho dos edifícios, com pequena distância entre eles, contribui para uma diminuição na quantidade de radiação solar incidente nas ruas e em outras áreas abertas entre os edifícios. A radiação que atinge as fachadas é parcialmente refletida pelas outras paredes dos edifícios vizinhos, variando de 20% a 80% da radiação emitida por essas paredes, dependendo de sua cor. Ao final deste processo, apenas uma fração pequena da radiação solar incidente nas paredes é refletida para a atmosfera, enquanto a maior parte é absorvida pelas paredes dos edifícios, assim, aumentando a temperatura nessa região (Romero, 2001).

2.2.4 Fator de Visão de Céu

O Fator de Visão de Céu (FVC) é um parâmetro adimensional que quantifica o quanto do céu é visível a partir de um determinado local, representando o ângulo de obstrução do hemisfério celeste (Barbirato *et al.*, 2007). O FVC varia de 0 a 1, onde valores próximos de 1 indicam que quase todo o hemisfério celeste é visível, como em áreas abertas, planas ou picos de montanhas. Já valores próximos de 0 ocorrem em locais profundos, como sumidouros e partes baixas de vales profundos, onde quase nenhuma parte do céu é visível (Zakšek *et al.*, 2011).

O FVC influencia a troca de calor por radiação entre os elementos urbanos e com o céu. Quando há obstrução, o ambiente tem maior dificuldade em dispersar a energia térmica armazenada para a atmosfera, pois a verticalização aumenta a superfície exposta à radiação solar, levando a um maior acúmulo de calor. Em contrapartida, um FVC mais elevado resulta em menor acúmulo de calor, especialmente durante o pôr do sol, aumentando a capacidade de resfriamento. Assim, o FVC representa a relação geométrica entre o céu e a Terra, sendo associado ao fluxo de radiação através de expressões trigonométricas que comparam a radiação recebida por uma superfície plana com a de todo o ambiente radiante (Barbirato *et al.*, 2007).

A temperatura da superfície está estatisticamente relacionado ao FVC (Eliasson, 1996). Sendo assim, à medida que os cânions de rua se tornam mais estreitos, eles ficam cada vez mais isolados termicamente da atmosfera acima (Mills & Arnfield, 1993). Os cânions por sua vez, são formados pelo quantidade, altura e alinhamento dos edifícios ao longo de uma rua estreita.

2.3 CONFORTO TÉRMICO

Para ASHRAE (1992), o conforto térmico é uma condição subjetiva que expressa a satisfação com o ambiente térmico ao redor da pessoa, envolvendo tanto aspectos fisiológicos quanto psicológicos, que variam de pessoa para pessoa. Esses fatores podem influenciar tanto a saúde quanto o desempenho individual de cada indivíduo.

O conforto térmico das pessoas no ambiente exterior é um dos fatores que influenciam as atividades ao ar livre em ruas, praças, parques infantis, parques urbanos, entre outros. A resposta ao conforto térmico pode ser inconsciente, mas frequentemente é resultado da diversa utilização dos espaços urbanos e de seu impacto subsequente no aumento ou na redução do isolamento e da exclusão social. O sucesso ou fracasso de um espaço urbano também depende de suas condições climáticas (Nikolopoulou & Lykoudis, 2007; Matzarakis, Rutz & Myer, 2007; Nikolopoulou, Baker & Steemers, 2001).

Para avaliar as condições de conforto é importante considerar diversos aspectos, como temperatura do ar, humidade relativa, ventilação, radiação solar, além da necessidade de o indivíduo estar adequadamente vestido e sem problemas de saúde ou aclimatação. Assim, é importante lembrar que as condições ambientais locais sempre influenciam o conforto térmico de maneiras diversas, de acordo com o clima. Em outras palavras, as percepções de conforto dos habitantes de regiões quentes e húmidas serão diferentes das dos habitantes de locais com climas quentes e secos, bem como das regiões de clima temperado ou frio (Frota, 2003).

Ao longo do tempo, vários índices para avaliar conforto térmico foram desenvolvidos, onde muito deles foram simples e efetivamente limitados (Baltazar, 2014). Essas limitações se davam pelo fato de que os cálculos levavam em consideração uma menor quantidade de variáveis, atribuindo uma menor riqueza aos resultados. Um dos índices que pode ser utilizado é o PMV (Predicted Mean Vote – Voto Médio Estimado), que foi criado por Fanger, os quais se baseiam em análises estatísticas de resultados em vários ensaios. Este índice representa uma previsão de voto médio de sensação térmica, com base num grupo de indivíduos de idade adulta num ambiente térmico avaliado. Dependendo das condições registadas obtém-se uma previsão baseada numa escala de sete níveis, como representado na Tabela 3, expressando assim sensação térmica expetável (Coelho, 2014).

Tabela 3 – Níveis de classificação para o PMV (Predicted Mean Vote)

+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Levemente quente
0	Neutro
1	Levemente frio
2	Frio
3	Muito Frio

Fonte: Adaptado de ISO 10551 (1995).

2.3.1 Carta bioclimática de Olgay

A carta bioclimática de Olgay é uma ferramenta proposta na busca por adaptar as edificações ao clima, com base nas condições climáticas externas. O gráfico apresenta uma zona de conforto no centro, enquanto os elementos climáticos são representados por curvas ao redor. Essas curvas indicam as correções necessárias para alcançar a sensação de conforto em qualquer ponto que esteja fora da área delimitada.

O diagrama é composto por valores de temperatura no eixo vertical e de umidade no eixo horizontal, com uma zona central representando a área neutra ou de conforto (Figura 2.3). Essa área não tem limites rígidos, podendo variar conforme o indivíduo (Olgay, 1963). No entanto, ainda segundo o autor, existem alguns limites de zona de conforto dita como o ideal, onde para a Humidade relativa está compreendida de 30% a 65%, enquanto para a temperatura do ar, essa zona fica localizada de 21°C a 27°C.

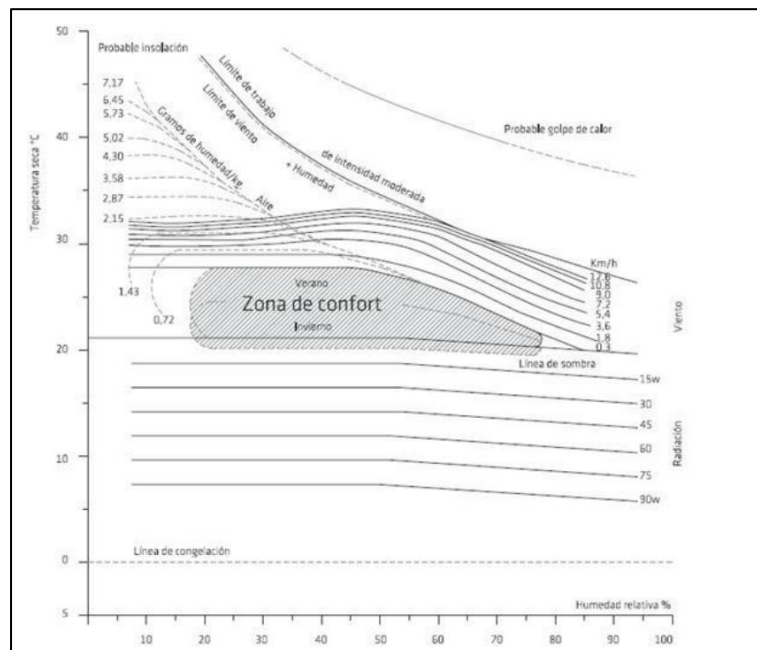


Figura 2.3 – Carta Bioclimática de Olgyay.

2.4 SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

O conceito de Soluções baseadas na Natureza (SBNs) teve sua origem no final dos anos 2000 e tem sido cada vez mais valorizado por organizações internacionais e dentro da União Europeia (UE). Sua principal proposta visa oferecer uma abordagem para a adaptação às mudanças climáticas, buscando gerar benefícios sociais, ambientais e econômicos para a sociedade. Desta forma, a *International Union for Conservation of Nature*, uma coalizão de várias organizações e governos nacionais, identificou, em 2018, seis principais desafios globais, incluindo as mudanças climáticas. Nesse contexto, as Soluções baseadas na Natureza (SBNs) emergem como ferramentas-chave, promovidas pela Comissão Europeia como estratégias eficazes para lidar com esses desafios (Stöberl *et al.*, 2019).

As Soluções baseadas na Natureza (SBNs) empregam processos e recursos naturais complexos, como a regulação de fluxos de água e o armazenamento de carbono, visando a redução do risco de desastres ambientais. Essas soluções demonstram resiliência às mudanças e são eficientes em termos energéticos e de recursos, necessitando adaptar-se às condições locais para atender a esses critérios (Comissão Europeia, 2015).

As SBNs, como a infraestrutura verde, têm o potencial de reduzir substancialmente as temperaturas do ar e da superfície em áreas urbanas. Devido ao seu crescimento natural e aos múltiplos benefícios que proporcionam, as árvores são reconhecidas como o elemento natural mais eficaz para mitigar condições extremas de calor e promover o conforto térmico em espaços externos (Abdel-Aziz et al., 2015).

2.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A complexidade dos fenômenos naturais torna seu estudo e compreensão desafiadores. Uma maneira de abordar essa complexidade é através da aplicação de modelos de análise, que permitem analisar ou antecipar esses fenômenos. Assim, a modelagem é o processo de gerar modelos, enquanto a simulação é a execução desses modelos, sendo crucial calibrá-los com dados de monitoramento (Kobiyama & Manfroi, 1999).

Atualmente, há uma variedade de modelos disponíveis para pesquisa. No entanto, é importante salientar que na climatologia são utilizados modelos que visam a previsão regional e global, a geração de cenários, a análise de índices e a avaliação dos impactos de variáveis meteorológicas, entre outras finalidades (Bento, 2018).

Um aspecto crucial da modulação é o controle dos processos, o qual previne surpresas durante a execução ao antecipar situações desfavoráveis. Isso permite a implementação ágil de ações preventivas e corretivas, uma vez que as informações estão organizadas e acessíveis (Romano & Back, 2001).

2.5.1 Representação de formas de modelagem

Os modelos climáticos desempenham um papel crucial na previsão do comportamento climático. Por meio deles é possível compreender até que ponto as mudanças climáticas derivam da variabilidade natural, da intervenção humana ou de suas combinações. Suas projeções e resultados oferecem informações essenciais para aprimorar a tomada de decisão no gerenciamento e manejo de uma região estudada (GFDL, 2020).

Com o tempo, foram desenvolvidos e explorados diversos modelos, incluindo modelos empíricos, analíticos e computacionais, cada um desempenhando um papel na modelagem do clima. Segundo Brandão (2009), os modelos computacionais têm como objetivo simular as condições do clima urbano em um ambiente computacional tridimensional, onde se insere o ENVI-met.

2.6 ENVI-met

O ENVI-met se trata de um software de modelagem 3D de alta resolução que simula com precisão processos microclimáticos complexos, onde as principais variáveis do modelo atmosférico são a temperatura do ar, temperatura média radiante, humidade e fluxo do vento (Bruse, 2004). Permite fornecer informações detalhadas sobre como os fatores ambientais que afetam o design urbano, auxiliando na tomada de decisões informadas no planejamento urbano, no desenvolvimento de infraestruturas verdes e nas estratégias de enfrentamento das mudanças climáticas. Por meio do ENVI-met, é factível elaborar um cenário tridimensional para simular o microclima urbano (Castelo Branco, 2009).

Como mencionado anteriormente, os avanços e alterações climáticas decorrentes da expansão urbana substancial levaram à exploração de alternativas para melhorias do clima urbano. Diante da importância da modelagem na análise de hipóteses que podem subsidiar o planejamento urbano e considerando o desenvolvimento contínuo das técnicas de simulação, tornou-se cada vez mais viável representar o espaço por meio de modelos tridimensionais. Nesse contexto, o ENVI-met emergiu como um dos programas mais proeminentes utilizados para a modelagem do microclima tridimensional (Ali-Toudert *et al.*, 2005).

O software constitui um modelo holístico de microclima no qual todos os diversos elementos, sejam urbanos ou paisagísticos, interagem entre si. Seus módulos de cálculo abrangem uma variedade de disciplinas científicas, como a dinâmica de fluidos, a termodinâmica, a fisiologia das plantas e os solos. Seu princípio fundamental reside na integração de várias abordagens em um único modelo, visando reproduzir sinergias e fornecer informações realistas (Bruse & Simon, 2020).

Uma de suas principais vantagens é ser um dos primeiros modelos a reproduzir os principais processos atmosféricos que influenciam o microclima. Isso se deve à inclusão do fluxo dos ventos, sua turbulência, os fluxos de radiação, a temperatura e a umidade, fundamentados nas leis da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica. O modelo simula a dinâmica microclimática ao longo de um ciclo do dia em estruturas urbanas complicadas, com vegetação e edifícios de várias formas e tamanhos. Apresenta uma boa resolução espacial e temporal, permitindo uma compreensão precisa do microclima em pequena escala (Ali-Toudert & Mayer, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Bragança situa-se no extremo nordeste de Portugal, entre a Serra de Montesinho ao norte e a Serra da Nogueira a oeste, e conta com uma população de aproximadamente 25.000 habitantes (Bragança, 2008). O seu espaço urbano é caracterizado por uma variedade de construções, incluindo bairros com edifícios plurifamiliares e unifamiliares, assim como áreas comerciais e industriais. A economia local tem como principal pilar os serviços, predominantemente públicos, com uma atividade industrial de representatividade modesta (Gonçalves, 2018).

A pesquisa foi conduzida na Praça Camões (Figura 3.1), situada na região central da cidade de Bragança. Esta localização é caracterizada pela proximidade a pontos significativos, tais como a igreja da Sé e a biblioteca municipal, e tem uma área com cerca de 5.520 m² (Google Earth). Além disso, é conhecida por sediar diversos eventos regionais, incluindo as celebrações do aniversário da cidade e do Natal. Consequentemente, a praça atrai um grande número de visitantes, com uma intensificação durante os períodos festivos. Devido a essa característica é considerado um ambiente ideal para a realização do estudo em questão.

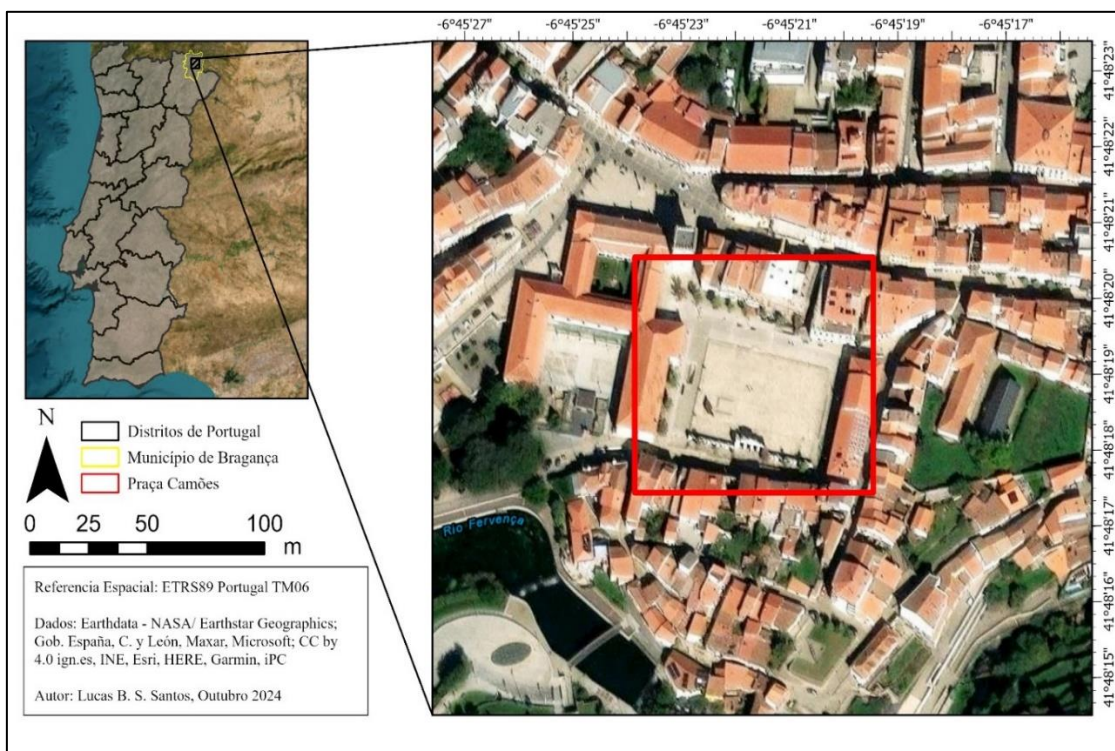


Figura 3.1 – Mapa de localização da Praça Camões.

Deste modo, a área apresenta uma estrutura circundada por edifícios, caracterizada por uma notável verticalidade, atingindo em sua maioria uma altura de 12 metros. Além disso, o piso é revestido com paralelepípedos e lajes de pedra e escassa vegetação, totalizando aproximadamente 17 árvores na região, todas pertencentes à mesma espécie.

3.2 CLIMA DA REGIÃO

De acordo com o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e a classificação de Köppen-Geiger, o clima de Portugal Continental pode ser dividido em duas regiões de clima temperado. Uma delas é marcada por invernos chuvosos e verões secos (Csa), enquanto a outra apresenta invernos chuvosos, verões mais secos e menos quentes (Csb). Desta forma, em Bragança, o clima é temperado, classificado como Csb, caracterizado por verões quentes e secos, além de invernos chuvosos, com temperaturas geralmente amenas a frias (Köppen, 1936).

Quando analisamos as estações do ano é possível perceber uma grande amplitude térmica, indo de temperaturas muito baixas a muito altas durante o ano. Assim, as temperaturas na região tendem a ser baixas durante a maior parte do ano, especialmente durante a noite. Durante os meses mais quentes, especialmente no verão, as temperaturas podem exceder os níveis ideais de conforto (Gonçalves, 2014).

Quanto à precipitação, em Bragança, há uma concentração elevada durante o inverno, enquanto nos meses mais quentes ocorre uma redução. Em relação ao vento, há predominância dos ventos do oeste e noroeste, exceto nos meses de novembro a fevereiro, quando os ventos do Sul prevalecem. A maior velocidade do ar é observada de fevereiro a maio (Gonçalves, 2014).

Segundo a normal climatológica de Bragança (1981-2010), disponibilizadas pelo IPMA, o mês de dezembro possui a maior média de precipitação (121,6 mm), enquanto o mês de julho possui a menor (15,4 mm), dados esses representados na Figura 3.2. O mesmo ainda mostra a média da Temperatura do ar, onde o mês de julho tem a maior (21,7 °C), e o mês de janeiro a menor (4,5 °C), representados na Figura 3.3.

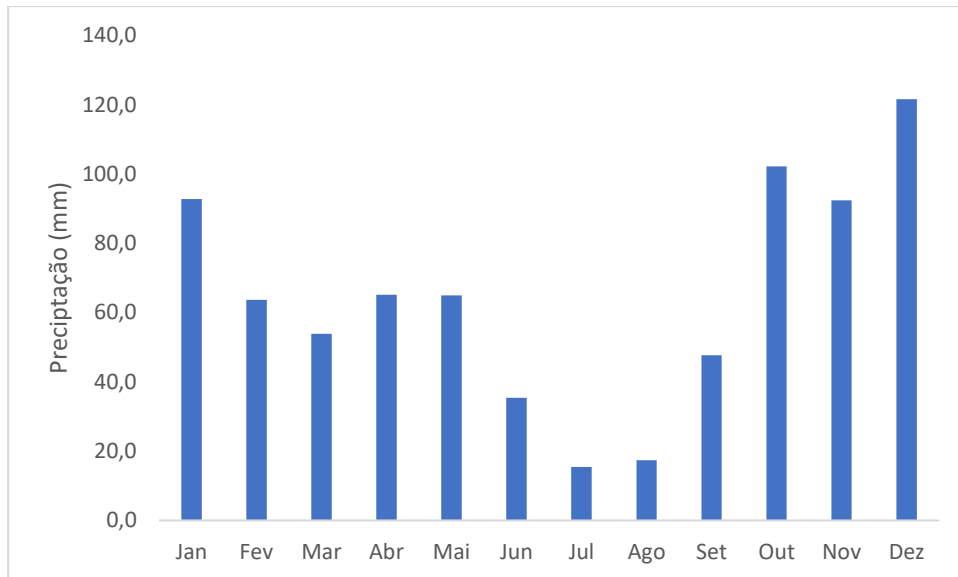


Figura 3.2 – Normal Climatológica, 1981-2010, de Precipitação disponibilizada pelo IPMA.

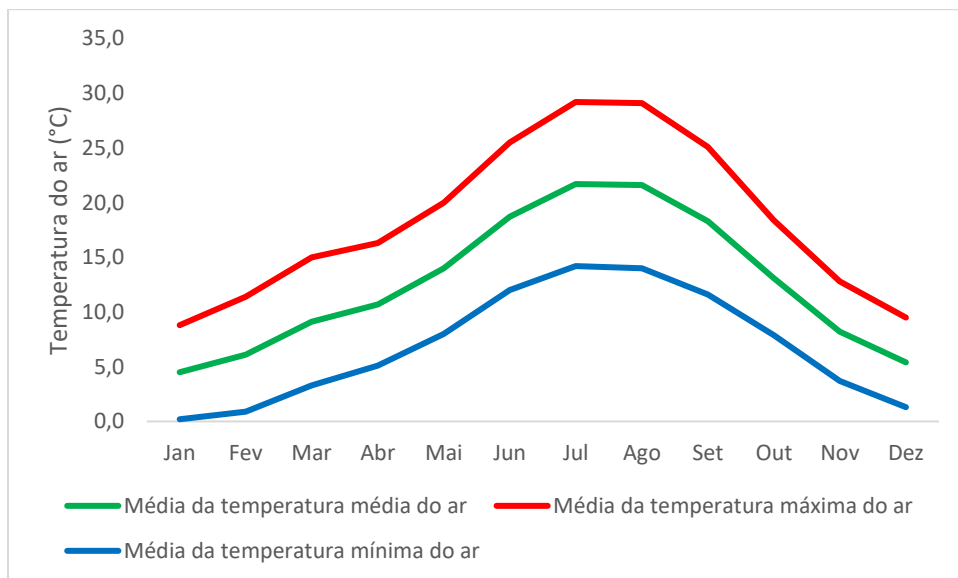


Figura 3.3 – Normal Climatológica, 1981-2010, de Temperatura do ar disponibilizada pelo IPMA.

3.3 MEDIÇÕES DE DADOS E MONITORIZAÇÃO CLIMÁTICA

Para iniciar a modelagem e o estudo, foram coletados dados físicos e climáticos. Com essa informação, foi possível iniciar as modelações, simulações e monitorar o clima da região utilizando o software ENVI-met.

Para efetuar os registros foram utilizadas estações micrometeorológicas. Desta forma, foi utilizado uma estação registradora de dados de microclima térmico – Datalogger, Delta Ohm 32.1, três estações Delta Ohm 32.3 (Figura 3.4) e um sensor de monitoramento fixo (TINYTAG TGP-4500) (Figura 3.5). Os dados recolhidos foram utilizados de entrada e para a validação do cenário através dos dados gerados pelo ENVI-met.

Os Dataloggers são aparelhos desenvolvidos para monitorar e gravar dados relacionados ao microclima térmico. Os dispositivos são registradores de dados versáteis projetados para medir as condições ambientais. Sua principal função é possibilitar análises de microclima no ambiente de trabalho, embora também possam ser utilizados em áreas externas. Cada um permite o gerenciamento de três programas operacionais, que o usuário pode carregar conforme as necessidades de medição. Esses programas abrangem análises microclimáticas, desconforto térmico e parâmetros físicos, baseando-se em índices como Humidade Relativa (HR), Temperatura Radiante Média (T_{mr}), Temperatura do ar (T_a), Temperatura de Globo (T_g), Temperatura de Bulbo Úmido (T_w), Isolamento Requerido para Vestimentas (IREQ), Velocidade do ar (V_a), Temperatura de Bulbo Úmido e Globo (WBGT), Índice de Sensação Térmica (WCI), Voto Médio Estimado (PMV), Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPD), entre outros. A diferença entre eles está na quantidade de entradas para sondas com módulo SICRAM, o primeiro (Delta Ohm 32.1) possui oito entradas, enquanto o segundo (Delta Ohm 32.3) conta com três. O primeiro segue o padrão Delta Ohm 32.1, incluindo as normas ISO7726, ISO7730, ISO7243, ISO7933, ISO11079 e ISO8996, enquanto o segundo, Delta Ohm 32.3, se baseia nas normas ISO 7243, ISO 8996, ISO 7726 e ISO 7730. O intervalo de medição pode ser configurado pelo usuário em intervalos de tempo, como a cada minuto, hora, conforme a sua preferência. Logo, os dados ficam registrados no equipamento e depois são descarregados em um computador para serem analisados.

Da mesma forma, o TinyTag TGP-4500 é responsável por registrar dados de Temperatura do ar e Humidade relativa. O sensor de Humidade relativa apresenta boa resistência à humidade e condensação, garantindo uma eficácia aprimorada nos registros.



Figura 3.4 - Registradores de dados de microclima térmico – Datalogger, Delta Ohm 32.1 (Esquerda) e Delta Ohm 32.3 (Direita).



Figura 3.5 – Registrador de dados de microclima térmico - Sensor TinyTag.

3.3.1 Período de medição

As medições foram realizadas nos meses de março, abril e julho de 2024, sendo em 3 dias distintos, durante a primavera e o verão. As medições decorreram durante o dia todo, desde o horário de nascer até o pôr do sol. Ambas as estações são caracterizadas por dias ensolarados, registrando suas maiores temperaturas durante o verão, que podem chegar até 40° C.

Foram selecionados quatro pontos de coleta. Esses pontos foram distribuídos pela área da seguinte forma: um no centro da praça, identificado como sensor A; um à Sudeste (SE), identificado como sensor B; outro a Noroeste (NO), próximo às paredes, identificado como sensor C; e um a Norte (N), denominado sensor D, localizado junto ao sensor fixo na praça (Sensor E) (Figura 3.6). Com isso, os dados registrados foram compilados em laboratório e analisados, para assim, serem realizadas as comparações.

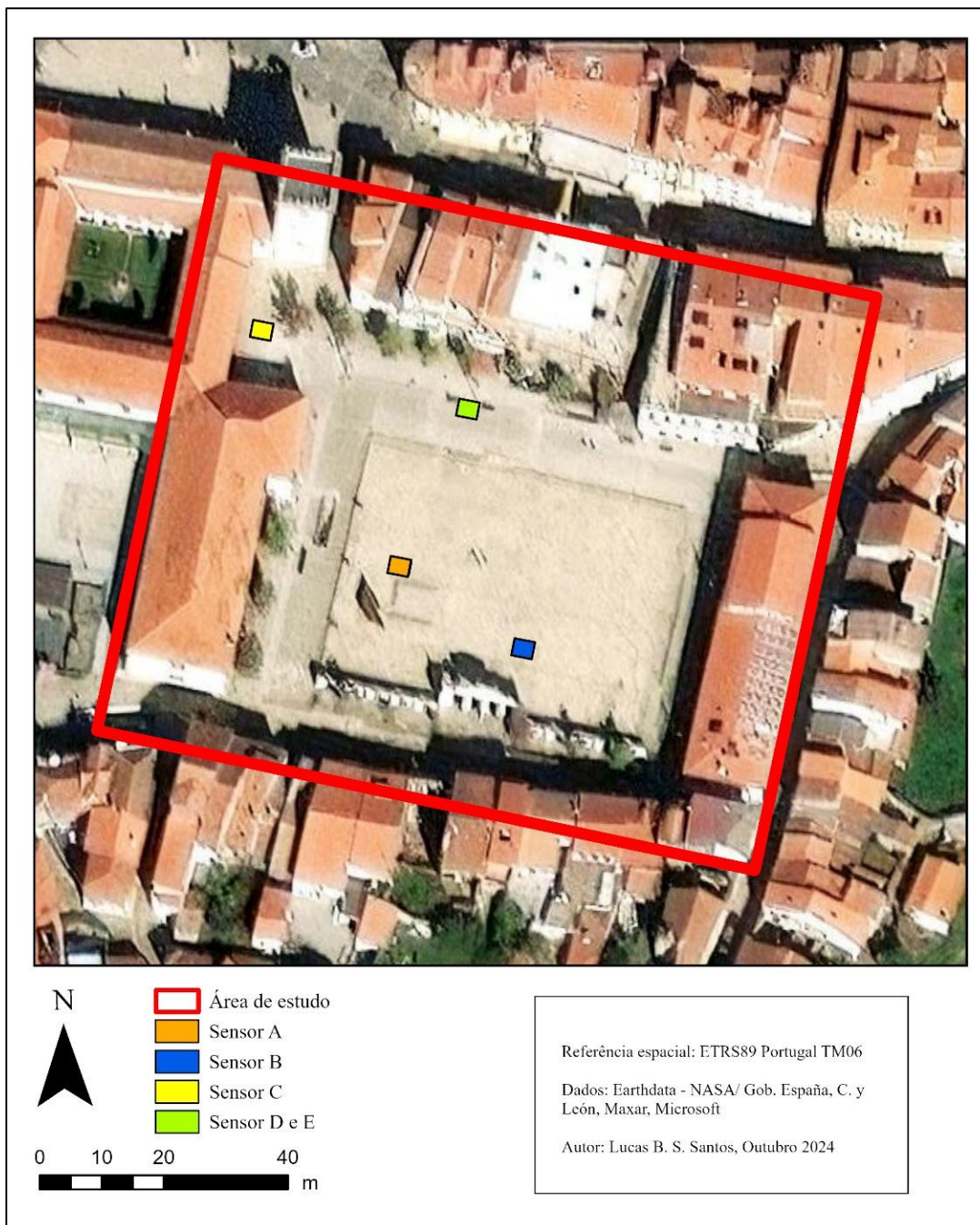


Figura 3.6 – Mapa com os pontos de monitoramento.

A primeira coleta de dados foi realizada no dia 22/03/2024, um dia atípico para o início de primavera, pois as temperaturas se encontravam bastante elevadas. Nessa mesma ocasião, a região enfrentou uma tempestade de areia proveniente de ventos da África, o que pode ter interferido na radiação que chegava a superfície. Por outro lado, nos dias 15/04/2024 e 17/07/2024, não foram identificadas anormalidades, e tudo ocorreu conforme o esperado para a estação do ano.

3.4 MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS ESPACIAIS

Foram realizados levantamentos das dimensões dos edifícios, das características da vegetação e das superfícies. Com isso, foi possível estabelecer um banco de dados espacial de forma clara para inserir as informações no programa.

3.4.1 Dimensionamento dos edifícios

A praça é circundada por edifícios, e para uma análise mais precisa, foi necessário compreender seus padrões. Para isso, utilizou-se o medidor de distância a laser (LB 500 STABILA), o qual é montado em um tripé com medidor de nível. Essa configuração permite medições mais precisas, evitando erros de desnível do terreno (Figura 3.7). A medição é realizada em três etapas para cada ponto: primeiro, mede-se a distância até o ponto de inserção no solo na direção desejada; em seguida, com o equipamento no mesmo local, a medida é feita horizontalmente, nivelada ao prumo; por fim, mede-se até o ponto mais alto do edifício. Dessa forma, o equipamento calcula automaticamente a altura levando em consideração as três medidas.



Figura 3.7 – Medidor a laser LB 500 STABILA.

Devido à sua dimensão reduzida e à acessibilidade facilitada, foi factível medir a altura de todos os edifícios na área utilizando o equipamento, o qual foi posteriormente registrado e categorizado para a continuidade do estudo.

3.4.2 Levantamento dos dados das árvores

Durante a modulação dos cenários, o software ENVI-met permite incluir os dados de dimensão e tamanho da copa, tamanho das raízes, tipo de folhas e suas características ao sazonais, fixação de CO₂, resistência dos estômatos e albedo das folhas, assim como outras funções e características, assim, contribuindo para resultados mais precisos em relação ao comportamento climático do local. Como mencionado previamente, devido à área limitada, houve uma pouca quantidade de árvores identificadas no local, levando a uma tabulação simplificada. Um total de 17 árvores, todas da mesma espécie, foi contabilizado (Figura 3.8). As alturas foram registradas usando um medidor a laser (LB 500 STABILA), enquanto o diâmetro do tronco e da copa foi medido com uma trena. Em seguida, os dados foram inseridos no software.



Figura 3.8 – Árvores registradas durante o verão (esquerda) e inverno (direita).

Foi possível observar que, além de apresentar escassa vegetação arbórea ao redor da praça, as árvores são de espécies caducifólias perdendo as folhas durante o inverno, assim, perdendo sua funcionalidade em algumas épocas do ano. As espécies foram identificadas e, posteriormente, incluídas no software juntamente com suas demais características coletadas.

3.4.3 Classificação do tipo de solo e superfície

Foi realizada uma avaliação no local para classificar as tipologias de superfície, analisando características específicas como formato e rugosidade, e foram tiradas fotografias para possibilitar comparações ao inserir os dados no software ENVI-met. Parte da superfície é composta por piso de paralelepípedos de pedra, outra por lajes de pedra, e a restante por calçada de cimento. Além disso, no centro, há uma elevação de aproximadamente 1 metro de altura que abrange uma área com um formato quadrado (Figura 3.9). No local é possível perceber poucos pontos de escoamento de água, ocorrendo alguma acumulação em momentos de maior precipitação.



Figura 3.9 – Condições do solo.

3.5 INQUÉRITOS

Os questionários foram validados pela Comissão de Ética do IPB e foram aplicados durante os dias de medições dos dados climáticos com o objetivo de compreender e avaliar a percepção do conforto térmico local. As pessoas que circulavam no local foram abordadas, inicialmente explicando o propósito da pesquisa e sua contribuição para o estudo. Em seguida, foram feitas perguntas básicas sobre a percepção pessoal do clima. Além disso, foram registradas informações como horário da aplicação do questionário, características da roupa utilizada pela pessoa, idade, altura, peso, gênero, país de origem, nível de atividade, última refeição e horário da mesma.

Com a roupa é associado o Nível de vestuário (clo), essa variável é responsável por quantificar o isolamento térmico proporcionado pela roupa. Ela indica a capacidade de uma roupa em reter calor, assim, sendo capaz de proteger o corpo humano das condições do ambiente externo. Esse termo é utilizado para estudos de conforto térmico.

Deste modo, no âmbito da avaliação da percepção do contexto térmico, os entrevistados eram questionados sobre sua percepção em relação a: Sensação térmica, Circulação do ar e Humidade, onde cada uma tinha sua classificação de resposta (Tabela 4). Com essas perguntas buscou-se avaliar o quanto as pessoas eram afetadas pelas mudanças de Temperatura do ar, Humidade relativa e Velocidade do ar ao longo do dia. Também foi realizado o questionamento sobre fatores de incomodidade térmica (onde várias opções podiam ser selecionadas) e que Temperatura do ar a pessoa pensava estar no momento. Neste contexto, é importante mencionar que as perguntas foram feitas em relação aos locais de medição (onde as pessoas estavam para responder aos questionários), naquele exato momento. Por fim, dados relacionados ao vestuário e nível de atividade eram registrados.

Tabela 4 – Perguntas 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

As escalas que nos questionários variavam de (-3) a (3), foram reclassificadas de 1 a 7 para uma melhor análise e interpretação dos resultados, que foram realizadas com o auxílio de software de análises estatísticas. Com isso, foi possível entender e criar um padrão de comportamento das variáveis para a avaliação do conforto térmico. No anexo A se encontra presente o modelo do questionário.

3.6 SIMULAÇÕES NO ENVI-MET

As simulações foram realizadas por meio do software ENVI-met em sua versão mais recente, a 5.1. Esta atualização apresenta melhorias relevantes em comparação às versões anteriores, incluindo um avançado recurso de caixa de diálogo para pesquisa e filtro de árvores, possibilitando uma exploração mais eficiente da ferramenta. A obtenção de acesso ao software requer a aquisição de uma licença de uso, a qual foi providenciada pelo IPB (Instituto politécnico de Bragança).

Desta forma, o software se fundamenta nas leis da termodinâmica e da dinâmica dos fluidos para realizar simulações das interações entre edifícios, vegetação e superfícies (Silva, 2018). Essas simulações exigem um período considerável para serem completadas, podendo algumas delas se estender por vários dias. Por conseguinte, é crucial possuir um hardware robusto e garantir que o sistema não seja interrompido devido à falta de conexão com a internet ou à falta de energia durante o processo.

De início, por se tratar de uma modelagem que é feita na aplicação SPACES, é necessário introduzir uma imagem de satélite com uma boa resolução. A imagem utilizada foi retirada do Google Earth, e os parâmetros do sistema precisaram ser ajustados de acordo com as dimensões reais da imagem, já que a confiabilidade do modelo é baseada nos pixels. Portanto, é crucial que ambos estejam na mesma escala, garantindo que a imagem aérea corresponda em altura e largura aos pixels definidos para processamento no software.

Como mencionado anteriormente, a confiabilidade do modelo depende da quantidade de pixels, e quanto mais pixels houver, maior será o nível de detalhe na modelagem. A área real da imagem tinha dimensões aproximadas de 106,5 metros por 94,3 metros. Para essa representação, utilizamos um grid tridimensional de 100 por 100 por 30, com valores de D_x , D_y e D_z , respectivamente, em torno de 1. Para simplificar a modelagem, a imagem foi girada em aproximadamente 11° diretamente no Google Earth, de forma a ajustar proporcionalmente o alinhamento das fachadas com os eixos Norte-Sul e Leste-Oeste, resultando em elementos retangulares. Essa rotação também foi comunicada ao software.

Após concluir o tratamento da imagem, os demais dados coletados precisam ser inseridos no sistema, assim, o programa consegue entender o que cada parte da imagem representa, sendo possível iniciar a modelagem 3D, para as futuras simulações. Os dados incluem volumetria e materiais dos edifícios, tipo de vegetação e respectivo posicionamento e forma, características da ocupação do solo. Também é necessário indicar dados meteorológicos de entrada no sistema, que foram coletados com o auxílio dos equipamentos.

Desta forma, para iniciar as simulações, foram fornecidos os dados de Temperatura do ar (T_a), Humidade relativa (HR) e Velocidade do ar (V_a) ao software ENVI-met. Com isso, os dados de entrada (meteorológicos), que foram recolhidos nos dias de coleta estão representados na tabela abaixo (Tabela 5).

Tabela 5 - Dados meteorológicos utilizados para simulação do software ENVI-Met.

		Ta (°C)	HR (%)	Va (m/s)
22/03/2024	Mínima	10	21	4,8
	Máxima	29	81	
15/04/2024	Mínima	10	10	4,8
	Máxima	30	93	
17/07/2024	Mínima	16	13	3,5
	Máxima	35	76	

3.7 CENÁRIOS

Através dos dados espaciais inseridos, foi elaborado um cenário base (CB) responsável por refletir as formas e características reais do local. Esse cenário foi usado para interpretar o microclima local e servir de base para a validação do modelo. Em seguida, um segundo cenário foi modelado, sendo ele o cenário alternativo (CA), ele incluía as modificações julgadas necessárias para melhorar as condições climáticas da região.

3.7.1 Cenário base

A partir da imagem tratada, a primeira etapa consiste na construção do modelo tridimensional que consistiu em replicar fielmente as características reais do local. Isso envolveu a inclusão do tipo de solo, dos edifícios com suas alturas específicas, e das árvores com suas características mais próximas da realidade. Dado que a área em questão possui uma predominância de pavimento com uma tonalidade mais clara e em algumas partes impermeáveis, o solo utilizado na praça foi o *Granit Pavement (single stones)* (GS).

Os edifícios circundam toda a praça e foram classificados em diferentes zonas de acordo com suas alturas variadas, que iam de 8 a 22 metros. Essas informações foram então inseridas no software para a devida representação visual.

As árvores na região eram todas da mesma espécie, conhecida como *Liquidambar styraciflua*, apresentam uma densidade de folhagem média para intensa e uma altura que varia de 5 a 10 metros. Para a simulação foi necessário identificar no banco de dados do sistema o que mais se enquadrava, levando em consideração os parâmetros de altura, densidade e diâmetros da copa e do tronco. Desta forma, foi utilizado a vegetação denominada como *Americam Sweet Gum (Young)* (60), que atendia os parâmetros requisitados. Com o modelo pronto (Figura 3.10), foi possível iniciar as simulações, e com isso discutir e entender os seus resultados.

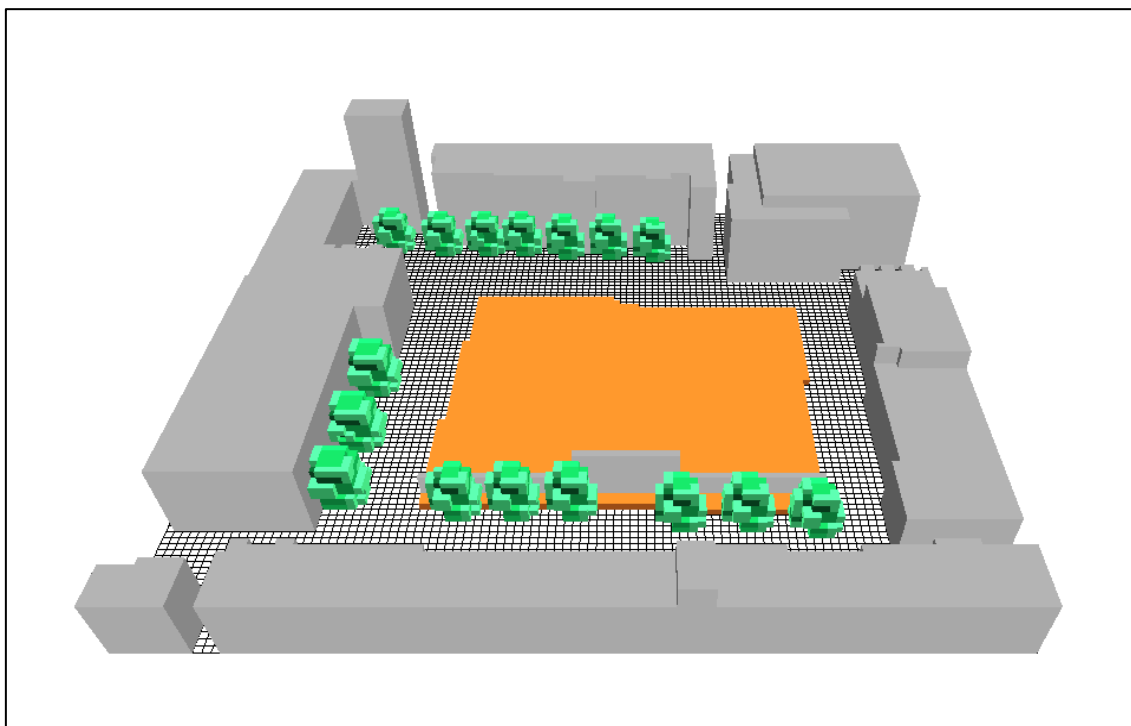


Figura 3.10 – Representação 3D do cenário base.

3.7.2 Cenário alternativo

Com base no primeiro cenário, apresentado na Figura 3.10, foi possível desenvolver uma alternativa que incorporou Soluções Baseadas na Natureza. O intuito era alcançar melhorias significativas em termos de Temperatura do ar, Temperatura Média de Radiação, e como consequência o conforto térmico. Essas variáveis, segundo os questionários, poderiam influenciar na sensação térmica.

Diversas variáveis foram levadas em consideração ao modelar o novo cenário, uma vez que a introdução de novas espécies foi dificultada por dois fatores principais: o terreno maioritariamente impermeável, que é desafiador, e que impede o crescimento adequado das raízes das árvores devido à falta de espaço, e a frequência de eventos realizados no local, que exige a manutenção de áreas abertas, livres de obstáculos, para garantir a realização dessas atividades.

Em colaboração com um técnico da Câmara Municipal de Bragança, responsável pela área do ambiente do município, foi elaborado um cenário em que as opções consideradas foram a introdução de novos exemplares de *Liquidambar styraciflua*, formando um corredor paralelo às árvores já existentes no local. Complementarmente, foi projetada a implementação de vasos móveis ao redor da área central da praça, permitindo sua remoção quando necessário. Para isso, foram utilizados ciprestes (*Cupressus sempervirens*).

O cenário base foi utilizado como referência, e as plantas foram acrescentadas na nova simulação. No total, foram representados 21 vasos móveis ao redor da praça, com um espaçamento médio de 5 metros entre eles. Além disso, foram introduzidas mais 8 plantas representando as *Liquidambar styraciflua*. Para representar as 21 (*Cupressus sempervirens*) plantas em vasos no software, foi utilizada a vegetação, que no software, é denominada como *cypress (ZY)*. A Figura 3.11 mostra o modelo finalizado, pronto para seguir com as próximas simulações.

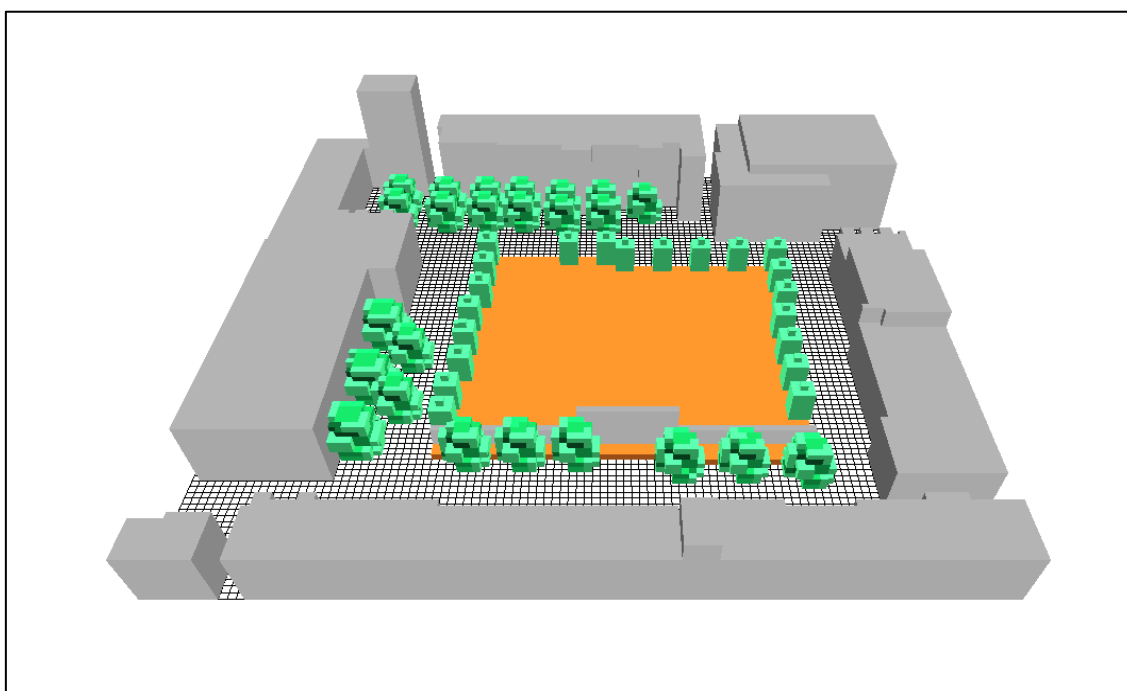


Figura 3.11 – Representação 3D do cenário alternativo.

Com o cenário alternativo pronto, as simulações foram executadas para os mesmos dias em que foram realizadas as coletadas de dados, ou seja, para os dias 22/03/2024, 15/04/2024 e 17/07/2024, pois assim seria possível fazer uma validação do modelo e potencializar as análises de conforto térmico buscando mostrar os potenciais benefícios da introdução de SBNs.

3.8 PROCESSAMENTO DE DADOS

Deste modo, as respostas aos questionários, assim como os dados obtidos nas coletas de medições e nas simulações foram processados com o auxílio de software estatísticos, Excel e a função LEONARDO do ENVI-met. Esse processamento possibilitou a geração de tabelas, gráficos, dados de correlação e mapas, facilitando a interpretação dos resultados e a validação dos modelos desenvolvidos.

Os gráficos foram criados para a comparação entre os dados medidos e simulados com intuito de realizar a validação do modelo, assim como as correlações e tabelas de diferenças. Os mapas plotados através da função Leonardo, serviram para visualizar as diferenças de temperaturas entre o cenário base e cenário alternativo após as simulações.

Todos os dados coletados foram organizados por média horárias com intuito de ficar no mesmo formato dos dados disponibilizados pelo software após as simulações, e todos os horários foram padronizados para o padrão internacional UTC (Coordinated Universal Time-Tempo Universal Coordenado).

Alguns testes estatísticos foram realizados durante a interpretação dos dados. O teste ANOVA foi utilizado para comparar as médias de vários grupos e verificar se havia diferenças estatisticamente significativas entre elas. Uma diferença significativa entre as médias é mostrada se o valor P for menor que 0,05 ($P < 0,05$).

Outro teste importante foi o de Matriz de Correlação de Pearson, que calcula os coeficientes de correlação (r) entre dois grupos de variáveis, permitindo determinar a força e a direção da relação linear entre duas variáveis numéricas. Os coeficientes variam de -1 a 1, sendo que valores negativos indicam correlação inversa (quando uma variável aumenta, outra diminui) e valores positivos indicam correlação direta (ambas as variáveis aumentam simultaneamente). Os valores de coeficiente (r) mais próximos de +1 e -1 são considerados como correlações fortes, em sentidos opostos, por outro lados, quanto mais próximo de 0 mais fraca é a correlação (Callegari-jaques, 2009). A Tabela 6 mostra essa relação.

Tabela 6 – Representação da classificação em relação ao coeficiente de correlação.

Coeficiente de correlação	Classificação
$0 < r \leq 0,1 $	Nula
$ 0,1 < r \leq 0,3 $	Fraca
$ 0,3 < r \leq 0,6 $	Moderada
$ 0,6 < r \leq 0,9 $	Forte
$ 0,9 < r < 1 $	Muito Forte
$r = 1$	Perfeita

Fonte: Adaptado de Callegari-jaques (2009).

Por fim, foi utilizado o teste Kruskal-Wallis para análise dos questionários. Este teste estatístico não paramétrico avalia se existem diferenças significativas entre três ou mais grupos independentes, especialmente quando os dados não seguem uma distribuição normal. Se o valor de P for inferior a 0,05 ($P < 0,05$), pode-se concluir que há diferenças significativas nas medianas dos grupos analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DOS DADOS MEDIDOS PELAS ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS

A partir das medições de todas as variáveis, foi possível traçar curvas que caracterizam o comportamento climático da Praça Camões. Neste contexto, é importante ressaltar que as medições foram realizadas em diferentes estações do ano, permitindo também uma validação parcial das simulações desenvolvidas. Embora os valores variem entre as estações, o padrão observado é semelhante em ambas. As curvas revelam que a temperatura é mais baixa no início do dia, atinge seu ponto máximo durante a tarde e diminui no início da noite. Em contraste, a umidade relativa apresenta um comportamento oposto, com os índices mais altos ocorrendo no começo e no final do dia.

Os diferentes pontos de coleta mostraram algumas variações entre eles, embora reduzidas. As medições de Temperatura do ar e Temperatura Média Radiante foram as mais influenciadas devido à menor exposição ao solar em certos períodos do dia, que variava conforme a posição do sol ao longo do dia, assim, apresentando curvas ligeiramente deslocadas. Durante os dias de coleta, alguns dos equipamentos apresentaram falhas de medições, o que pode ser percebido ao decorrer das análises.

4.1.1 Temperatura do ar

Inicialmente, para os três dias, foi realizada uma análise estatística para verificar a normalidade dos dados, confirmando sua adequação para aplicação do teste ANOVA. Os resultados do teste mostraram um valor de $P = 0,279$ para o primeiro dia, $P = 0,199$ para o segundo dia e $P = 0,05091$ para o terceiro dia, indicando a ausência de diferenças estatisticamente significativas nas médias entre dados dos diferentes pontos ($P > 0,05$).

No primeiro dia de coleta de dados, 22 de março de 2024, o sensor B apresentou falhas na coleta, o que permitiu trabalhar apenas com os dados dos sensores A, C, D e E (TinyTag). Os dados obtidos possibilitaram a construção de um gráfico que ilustra a evolução das temperaturas ao longo do dia, que é mostrado na Figura 4.1. Da sua análise resulta que as temperaturas permanecem baixas durante os primeiros momentos de medição sem grandes variações. Com o nascer do sol, há um aumento gradual da Temperatura do ar, até que as temperaturas atinjam um novo patamar de

estabilidade, por volta das 13 horas. No final da tarde, as temperaturas começam a diminuir, formando uma curva decrescente até atingir a novamente um período de variação mais lenta, após o por do sol. Assim, é possível observar uma maior variação das temperaturas registradas entre os pontos em determinados períodos do dia, especialmente durante o aquecimento das superfícies devido à incidência solar que acontece na parte da manhã, por volta das 9 horas. Neste dia, a Temperatura do ar alcançou seu valor máximo no ponto C, assim, registrando 30,4 °C às 13 horas. Por outro lado, a menor temperatura do dia foi registrada no ponto A, atingindo 10,1 °C às 6 horas.

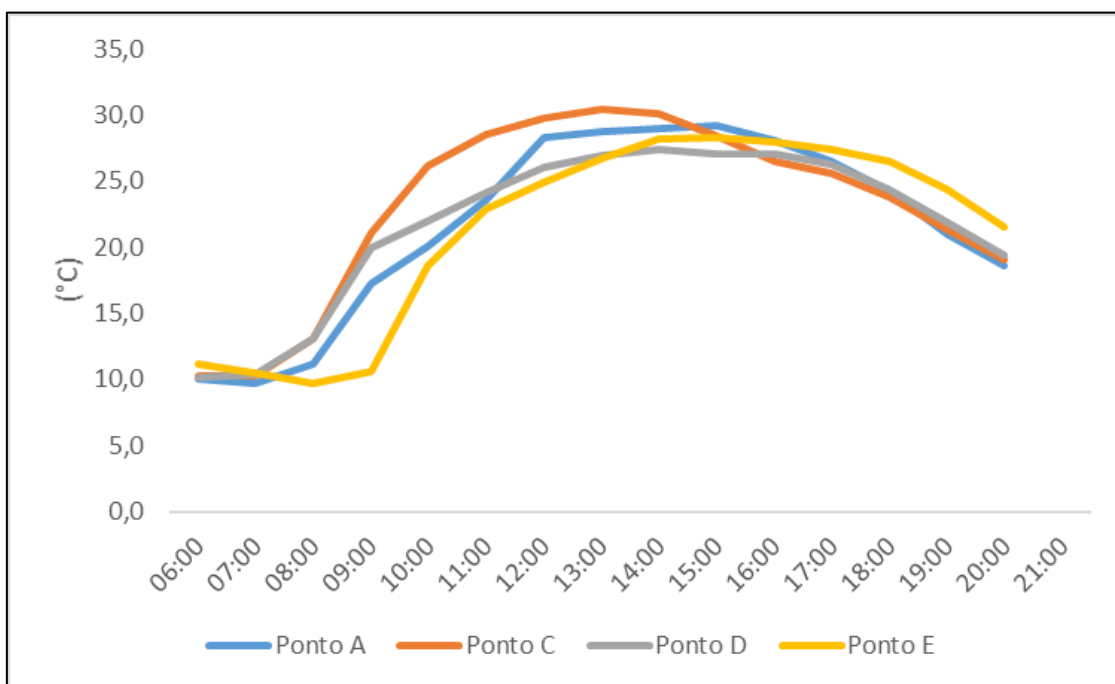


Figura 4.1 – Evolução da Temperatura do Ar durante o dia 22 de março de 2024.

No período a manhã, as temperaturas mais baixas são registradas no ponto A e no ponto E. A menor temperatura no ponto A pode ser explicada pela ausência de interferências de superfícies próximas, o que resulta em condições mais amenas. No caso do ponto E, a menor temperatura no período da manhã pode ser explicada pela posição do sensor, a 3 metros do solo, em contraste com os 1,5 metros dos restantes sensores, fato que pode afetar tempo o aquecimento do ar envolvente. Em contraste, os outros pontos registram temperaturas mais elevadas nas primeiras horas dos dia.

Na parte da tarde, as temperaturas em todos os pontos foram bastante próximas, no entanto, as menores temperaturas foram registradas nos pontos D e E. O ponto C começou a tarde com as temperaturas mais altas e terminou com as mais baixas, o que pode ser explicado pelas sombras que vão sendo projetadas pelos edifícios ao redor ao longo do dia, reduzindo a incidência de radiação solar direta.

No segundo dia de recolha, 15 de abril de 2024, o sensor C apresentou uma falha das 9 horas às 18 horas, mesmo assim, permitiu que os dados fossem trabalhados para se chegar a compreender o comportamento térmico do local. Com os valores recolhidos foi possível construir o gráfico que permite a representação das curvas o comportamento das temperaturas ao longo do dia (Figura 4.2).

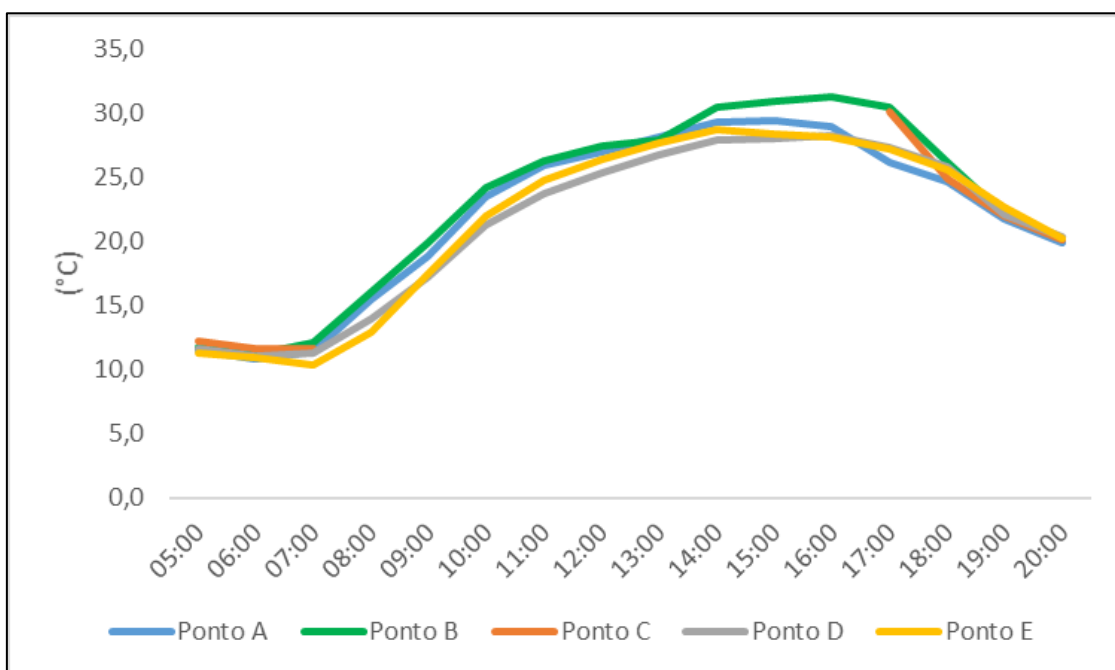


Figura 4.2 – Evolução da Temperatura do Ar durante o dia 15 de abril de 2024.

A Figura 4.2 apresenta um padrão semelhante ao observado no primeiro dia de coleta, com algumas variações na sobreposição entre as curvas e pouca diferenças entre elas. É importante destacar que cada coleta foi realizada em um mês diferente, o que faz com que os padrões de incidência solar variem ao longo do tempo. Dessa forma, o dia se inicia com temperaturas mais amenas, e a partir das 8 horas observa-se uma curva ascendente, que reflete o aumento gradual das temperaturas até se atingirem valores máximos. Durante a tarde, as temperaturas estabilizam, e no período noturno, ocorre uma diminuição gradual, formando uma curva descendente que culmina nos valores mínimos. A Temperatura do ar alcançou seu valor máximo do dia no ponto B, assim, registrando

31,3 °C às 16 horas. Por outro lado, a menor temperatura do dia foi registrada no ponto A, atingindo 10,8 °C às 6 horas.

Durante o período da manhã, as menores temperaturas foram registradas nos pontos A e E, enquanto que, no período da tarde, foram observadas nos pontos D e E. Esse padrão segue o mesmo comportamento do primeiro dia, que também apresentou as menores temperaturas nesses mesmos pontos para esses períodos.

Por fim, no último dia de coleta, 17 de julho de 2024, os sensores não apresentaram falhas, permitindo uma boa interpretação dos dados. Assim, seguindo o mesmo padrão dos dias anteriores, com os dados coletados, gráficos foram elaborados para representar o comportamento da temperatura a cada hora (Figura 4.3).

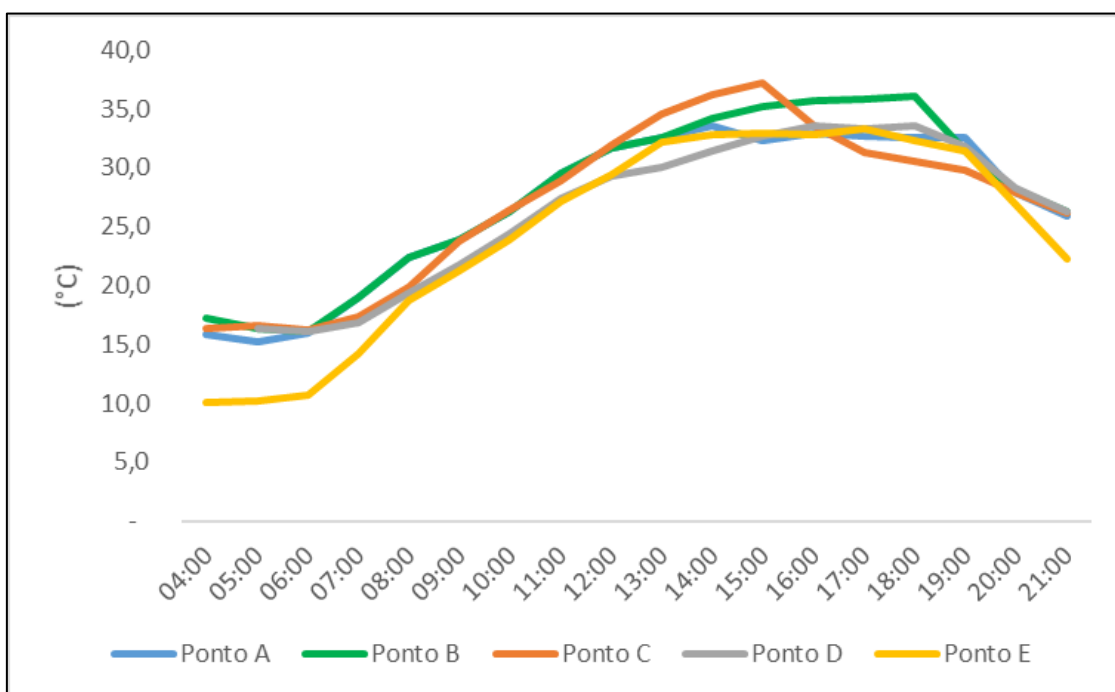


Figura 4.3 - Evolução da Temperatura do Ar durante o dia 17 de Julho de 2024.

O gráfico apresenta um padrão semelhante ao observado no primeiro e segundo dia de coleta, apenas com diferença nos horários em que os valores máximos e mínimos foram registrados. A Temperatura do ar alcançou seu valor máximo do dia no ponto C, assim, registrando 37,2 °C às 15 horas. Por outro lado, a menor temperatura do dia foi registrada no ponto E, atingindo 10,1 °C às 4 horas.

As menores temperaturas do ar foram novamente registradas nos pontos A e E, pela manhã, e à tarde nos pontos D, E e, em alguns momentos, no ponto A. Esse padrão reforça o mesmo comportamento observado no primeiro e no segundo dia. Do mesmo modo que no primeiro dia, a partir das 13 horas, o ponto C teve temperaturas mais altas e finalizou a tarde com as mais baixas, provavelmente devido às sombras projetadas pelos edifícios ao redor ao longo do dia, que reduz a incidência de radiação solar direta. Assim, os gráficos indicam uma consistência no comportamento ao longo dos três dias, com variações apenas nos horários em que ocorrem os máximos e mínimos e em seus respectivos valores.

4.1.2 Temperatura Média Radiante

Outra análise relevante a ser considerada é a da Temperatura Média Radiante, que reflete a temperatura média das superfícies dos elementos ao redor dos pontos, os quais trocam calor por radiação ou condução. A Tmr é registrada apenas nas estações microclimáticas (Sensores A, B, C e D).

Aqui também foi realizado uma análise estatística que atestaram a normalidade dos dados, permitindo a aplicação do teste ANOVA. Os resultados do teste mostraram um valor de $P = 0,451$ para o primeiro dia, $P = 0,230$ para o segundo dia e $P = 0,00227$ para o terceiro dia. Esse resultado indica a existência de diferenças significativas no terceiro dia ($P < 0,05$), e uma ausência de diferenças estatisticamente significativas nas médias para esta variável entre os grupos no primeiro e segundo dia ($P > 0,05$).

No dia da primeira medição (22 de março de 2024) foi possível coletar dados apenas nos pontos A e C, pois sensor B e D apresentaram falhas (Figura 4.4).

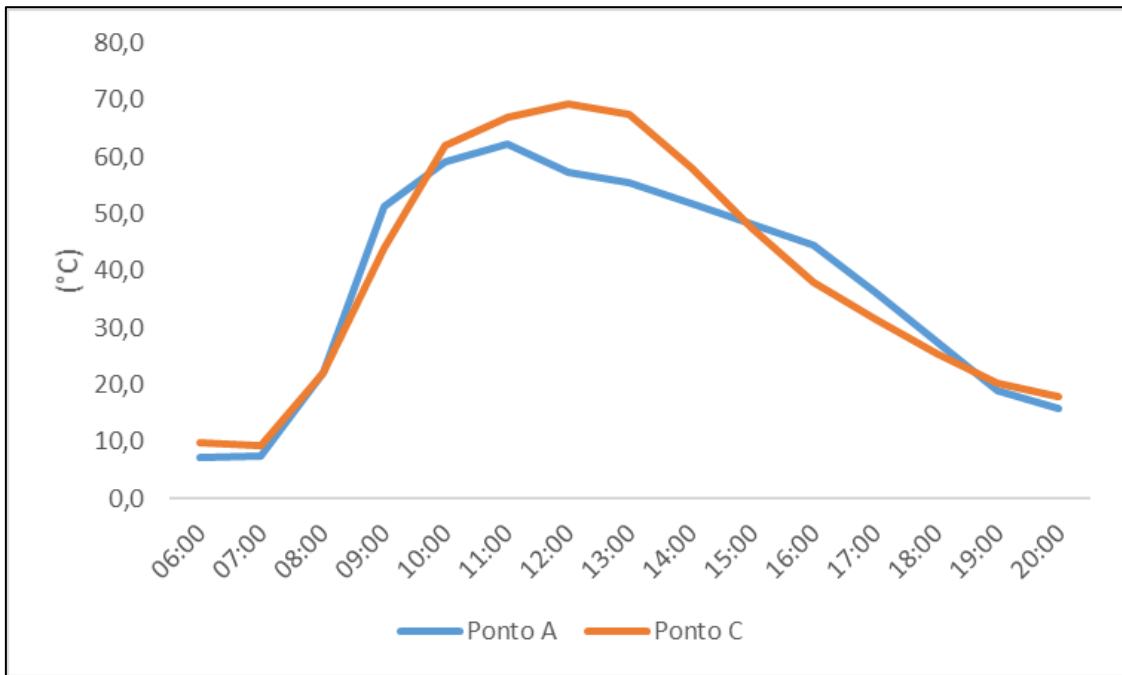


Figura 4.4 – Evolução da Temperatura Média Radiante durante o dia 22 de março de 2024.

As linhas do gráfico seguem um padrão consistente, começam baixas pela manhã, aumentam até estabilizar durante a tarde e, em seguida, declinam no final do dia. No entanto, existem algumas diferenças relativas entre os pontos, que é explicada pelas características dos locais. Nesse dia a variável alcançou seu valor máximo no ponto C, assim, registrando 69,3 °C às 12 horas. Por outro lado, a menor temperatura foi registrada no ponto A, atingindo 7,2 °C às 6 horas.

Durante as primeiras horas do dia, é possível ver que a curva do ponto C fica acima do ponto A. Os locais que ficam próximos a edifícios e árvores possuem um menor Fator de Visão do Céu (FVC). Com isso, durante a noite, esses locais têm um menor resfriamento e têm temperaturas ligeiramente superiores em comparação a áreas abertas. Isso pode explicar o comportamento das curvas de temperatura nas primeiras horas do dia. Em outras palavras, essas zonas reduzem a perda líquida de radiação de onda longa devido à menor visibilidade do céu (Oke, 1987).

Por volta das 9 horas da manhã, a curva de temperatura do ponto A fica acima da curva do ponto C. O ponto A está localizado mais ao centro da praça, em uma área aberta que não sofre interferência de sombras, o que permite um aquecimento mais rápido com os primeiros raios solares. Essa fator junto ao FVC explica a dinâmica de alternância observada entre as curvas ao longo do dia.

Durante o início do período da tarde, não existe uma variação relevante na posição relativa das curvas, e o ponto A registra as menores temperaturas médias radiantes, porém, o efeito se inverte depois das 15 horas, onde o ponto C é responsável por registrar temperaturas mais amenas. À medida que o sol se põe, as temperaturas vão diminuindo, apresentando uma menor variação até se equivalerem entre locais no final do dia. A partir das 18 horas, o ponto C volta a registrar as maiores temperaturas, devido a lenta troca de calor resultante do baixo FVC do local.

No segundo dia de recolha (15 de abril de 2024), para a análise da Temperatura Média Radiante, foram utilizados os sensores A, B, C e D. No entanto, o sensor C apresentou uma falha durante um período do dia (das 8 às 16 horas), mesmo assim, permitiu que fosse feita as interpretações. A figura 4.5 mostra o gráfico com a evolução da Temperatura Média Radiante durante o dia.

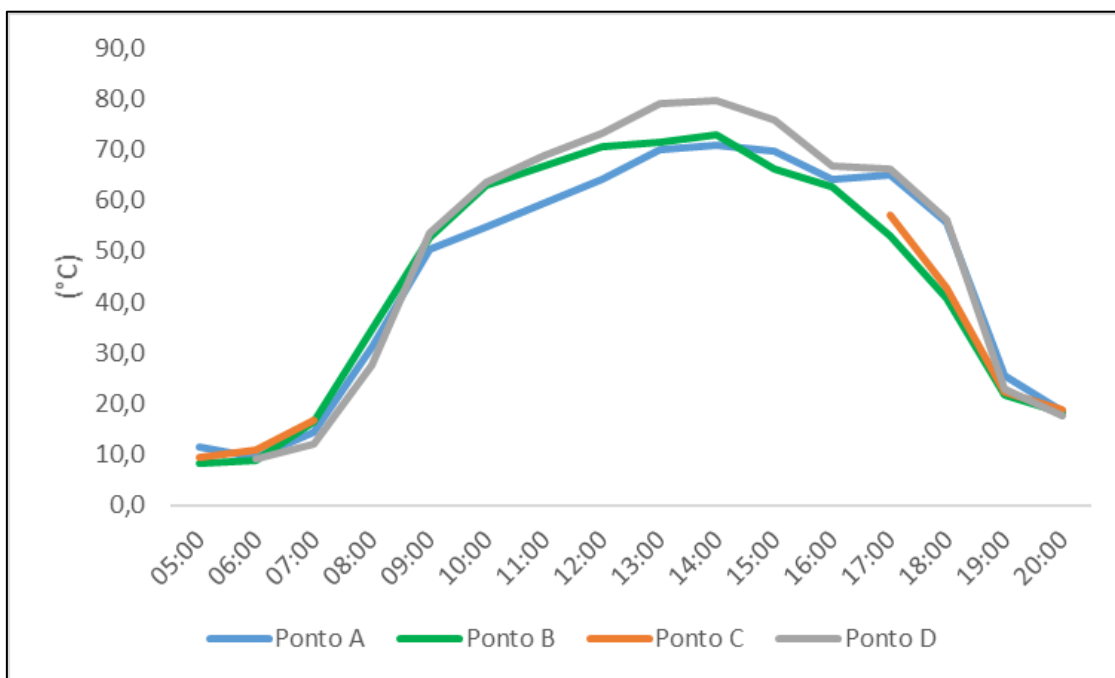


Figura 4.5 – Evolução da Temperatura Média Radiante durante o dia 15 de abril de 2024.

Aqui, a variável alcançou seu valor máximo no ponto D, assim, registrando 79,7 °C às 14 horas. A menor temperatura foi registrada no ponto B, atingindo 8,1 °C às 5 horas. Conforme mencionado anteriormente, o comportamento do sol muda ao longo das diferentes épocas do ano. Em um estudo realizado em Buenos Aires, Gangui *et al.* (2018) mostrou que o sol que observamos no céu (sol verdadeiro) se comporta de forma complexa, onde em algumas semanas do ano, o dia real dura um pouco menos de 24 horas e, também, o arco diurno seguido pelo sol através do céu muda com as estações do ano, fazendo com que as sombras dos objetos observadas no mesmo horário todos os dias variem ao longo do ano. Assim, as temperaturas mais elevadas foram registradas com um deslocamento de aproximadamente 3 horas em relação ao primeiro dia de coleta, que pode ser explicado por esse fator.

No período da manhã, as menores temperaturas médias radiantes foram registradas no ponto B e D. Durante esse intervalo, as temperaturas mais altas ocorrem próximas a estruturas, devido à menor irradiação do calor acumulado durante a noite.

Durante a tarde, mais precisamente das 12 horas às 17 horas, as curvas de temperatura atingiram uma estabilidade, com as menores temperaturas registradas nos pontos A e B, comportamento semelhante ao observado no primeiro dia, onde o ponto A apresentou as menores temperaturas nesse período. À medida que o sol se põe, as temperaturas médias diminuem e as oscilações entre as curvas se reduzem. A menor temperatura foi registrada no ponto D.

Por fim, no último dia de coleta (17 de julho de 2024), foram utilizados os dados de todos os sensores (A, B, C e E), e nenhum apresentou falhas. A Figura 4.6 mostra o gráfico com a evolução da T_{mr} durante o dia.

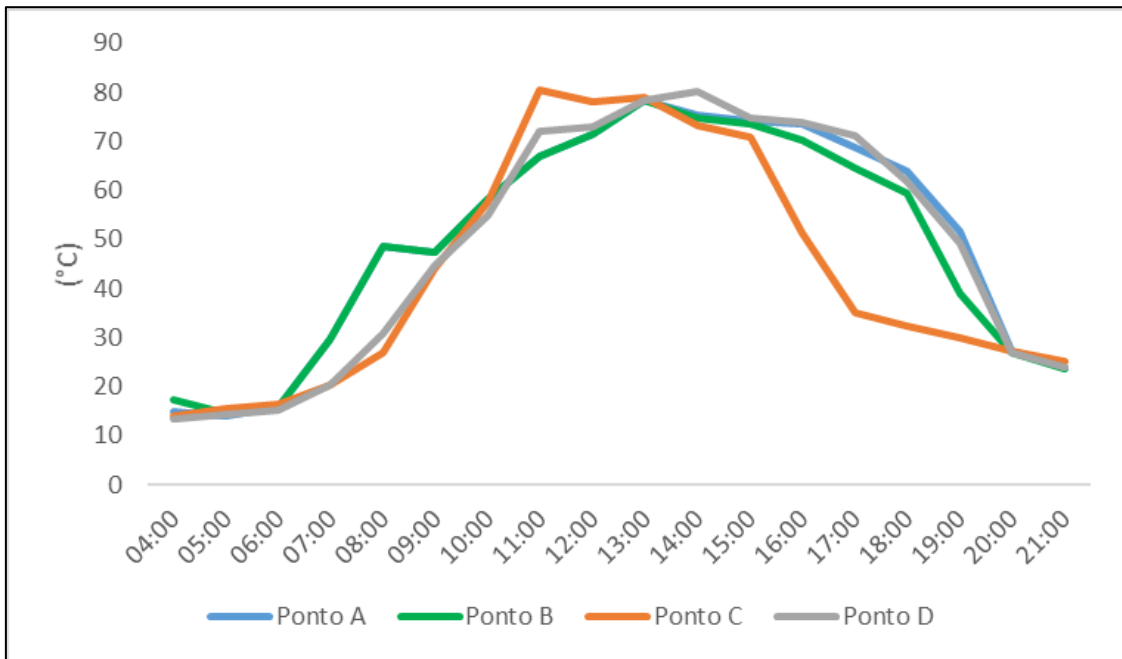


Figura 4.6 - Evolução da Temperatura Média Radiante durante o dia 17 de julho de 2024.

O padrão de aquecimento e resfriamento segue uma dinâmica semelhante dos dias anteriores e à da Temperatura do ar, uma vez que ambas as variáveis estão inter-relacionadas. A Temperatura Média Radiante alcançou seu valor máximo no ponto D, assim, registrando 80,0 °C às 14 horas. Por outro lado, a menor temperatura foi registrada no ponto C, atingindo 13,9 °C às 04 horas.

Para esse gráfico, as curvas apresentaram uma variação significativa, especialmente no período da manhã e depois das 15 horas. No dia da coleta, foi observada uma grande concentração de nuvens na região entre as 7 horas e 9 horas. Esse fator, deverá ter interferido diretamente nas medições, resultando em uma discrepância expressiva nos dados registrados.

Durante o período da tarde, a presença de nuvens foi residual, o que contribuiu para um comportamento mais constante nos dados. No entanto, à medida que se aproximava o período do pôr do sol, observou-se uma queda acentuada na curva do ponto C. Nesse momento, o sol estava a oeste, criando uma extensa faixa de sombra devido à presença de edifícios próximos ao ponto C, o que explica essa variação. Durante a noite, as curvas continuaram a cair até que, no final das medições, não há mais absorção de radiação solar após o sol se pôr completamente.

Novamente, as menores temperaturas no período da manhã foram registradas no ponto D, enquanto que, no período da tarde, foram registradas nos pontos A e B. Assim, reforçando o comportamento similar em relação ao primeiro e segundo dia de coleta.

4.1.3 Humidade relativa e Velocidade do ar

A Humidade Relativa (HR) e a Velocidade do ar (V_a) são parâmetros adicionais, cruciais para a avaliação do conforto térmico individual, pois influenciam diretamente a percepção de calor e bem-estar das pessoas. Esses dados foram registrados de maneira semelhante aos demais parâmetros, utilizando os mesmos dias de coleta. A HR foi monitorada por todos os sensores disponíveis, enquanto a medição da velocidade do ar não foi realizada pelo sensor de monitoramento fixo (TinyTag), pois não possui essa funcionalidade.

Pela interpretação dos dados presentes na Figura 4.7, é possível constatar que a HR é uma variável que segue um comportamento inversamente proporcional à Temperatura do ar, o que significa que em períodos de temperaturas mais baixas, os valores de humidade tendem a ser mais elevados, enquanto em momentos de temperaturas elevadas, a HR é geralmente menor. Diante disso, o comportamento da HR de acordo com as influências nos diferentes pontos de coleta pode ser interpretado de maneira semelhante, embora inversa, à análise dos dados de Temperatura do ar que foram realizadas anteriormente

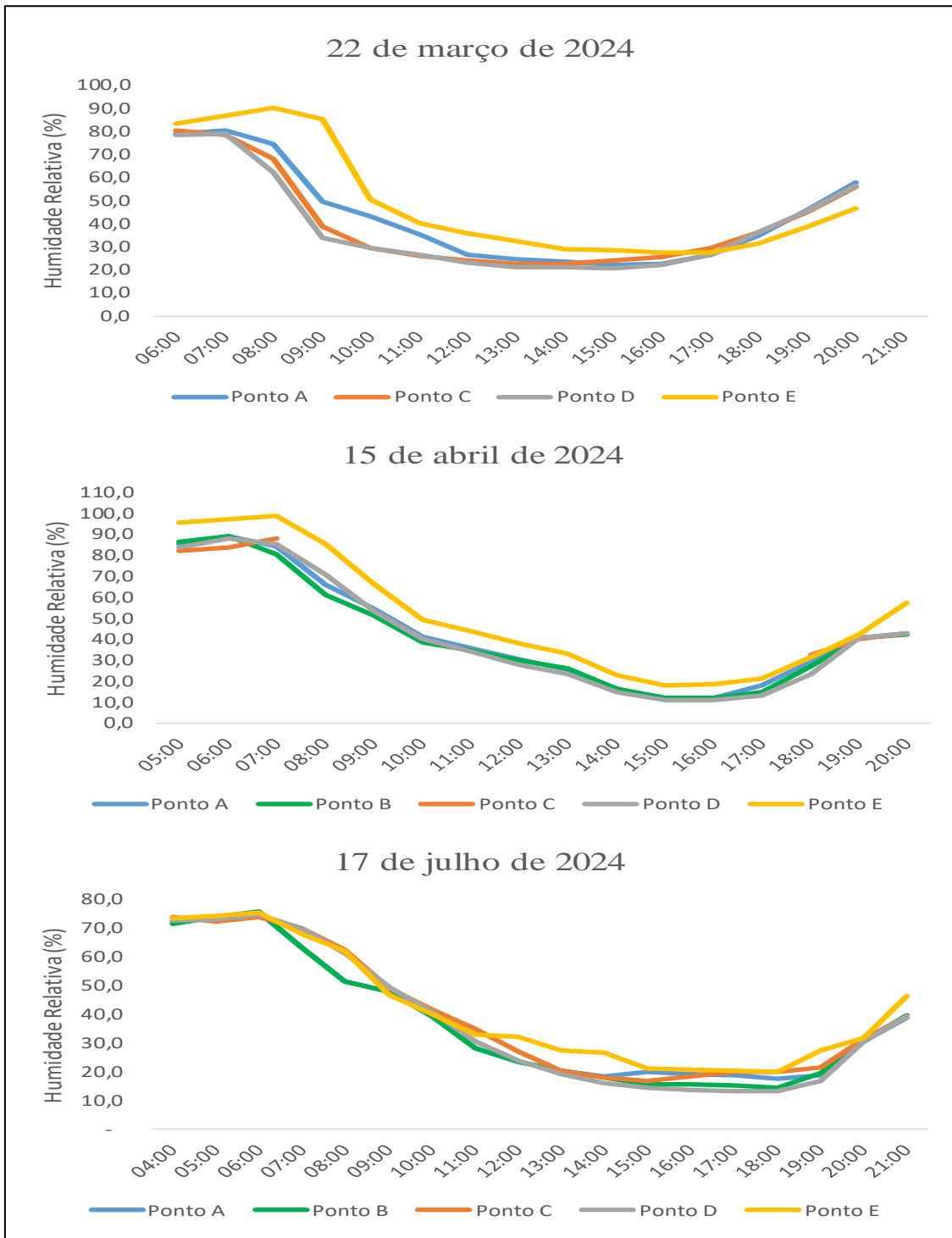


Figura 4.7 – Comportamento da Humidade Relativa durante os três dias de medição.

A Velocidade do ar segue um caminho diferente, onde ela tem uma grande variação durante o dia, com seus máximos e mínimos sendo registrados em diferentes horários para cada dia. Com a Figura 4.8 é possível visualizar esse comportamento.

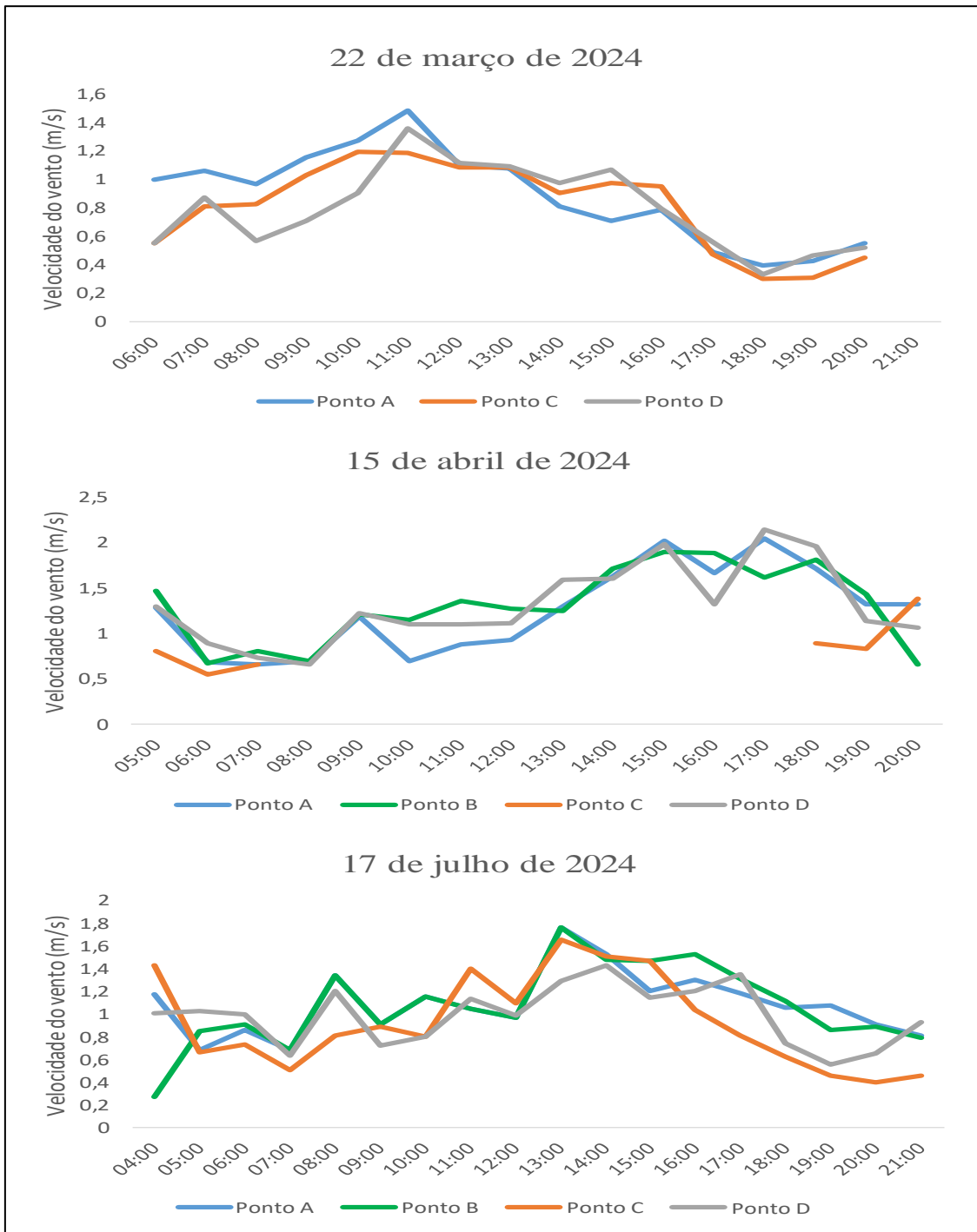


Figura 4.8 – Comportamento da Velocidade do ar durante os três dias de medição.

4.1.4 Correlação de dados


Para analisar a relação entre os dados coletados, foi feita a análise de correlação de Pearson. As análises de correlação dos dados foram realizadas para a Temperatura do ar e Temperatura Média Radiante para cada um dos três dias de coleta. Assim, gerando três tabelas para cada variável que foi analisada.

As seguintes Tabelas mostram as matrizes de correlação de Pearson para a Temperatura do ar. Os resultados mostram que, para todos os dias, todas os valores da matriz são positivos. Assim, permitindo identificar a existência de uma correlação diretamente proporcional e significativa entre os pontos.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para o primeiro dia de coleta (22 de março de 2024). As correlações variam de forte ($|0,6| < r \leq |0,9|$) a muito forte ($|0,9| < r < |1|$), sendo classificadas como fortes entre os pontos C e E, e entre os pontos D e E. Esse comportamento pode ser explicado pelas diferenças existentes no sensor E (TinyTag), já anteriormente apresentadas. Como resultado, o sensor fixo apresenta um comportamento ligeiramente diferente em comparação aos demais sensores em determinados momentos do dia, sendo mais marcado no período da manhã.

Tabela 7 – Matriz de correlação de Pearson para os valores Temperatura do ar no dia 22 de março de 2024.


	Ponto A	Ponto C	Ponto D	Ponto E
Ponto A	1	0,939	0,977	0,925
Ponto C		1	0,953	0,804
Ponto D			1	0,895
Ponto E				1



A Tabela 8 mostra os resultados para o segundo dia (15 de abril de 2024), confirmando as correlações positivas. As correlações são classificadas como muito fortes ($|0,9| < r < |1|$) em todos os casos, sendo a menor observada entre o ponto A e o ponto D. Destaca-se a correlação entre os pontos B e C, que foi quase perfeita.

Tabela 8 - Matriz de correlação de Pearson para os valores Temperatura do ar no dia 15 de abril de 2024.


	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
Ponto A	1	0,979	0,985	0,975	0,983
Ponto B		1	0,99	0,979	0,976
Ponto C			1	0,986	0,979
Ponto D				1	0,992
Ponto E					1



Conforme dito anteriormente, a Tabela 9 mostra que os valores são positivos, ocasionando em uma correlação direta. As correlações são classificadas como muito fortes, uma vez que estão próximas de 1. A menor correlação, nesse caso, foi entre os pontos C e D.

Tabela 9 - Matriz de correlação de Pearson para os valores Temperatura do ar no dia 17 de julho de 2024.

	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
Ponto A	1	0,976	0,948	0,965	0,988
Ponto B		1	0,941	0,978	0,982
Ponto C			1	0,924	0,951
Ponto D				1	0,975
Ponto E					1




Seguindo o mesmo caminho, a análise foi realizada para a Temperatura Média Radiante. As Tabelas a seguir mostram as matrizes de correlação de Pearson para a variável, todas os valores são positivos, permitindo identificar que existe uma correlação diretamente proporcional e significativa entre os pontos.

No primeiro dia, a matriz de correlação para a Tmr apresentou uma quantidade menor de dados devido a falhas nos sensores nesse dia, a Tabela 10 mostra os resultados. A correlação entre os pontos A e C é passível de ser classificada como muito forte ($|0,9| < r < |1|$).

Tabela 10 – Matriz de correlação de Pearson para os valores de Temperatura média radiante no dia 22 de março de 2024.


	Ponto A	Ponto C
Ponto A	1	0,923
Ponto C		1



Os resultados da matriz de correlação para os dados do segundo dia podem ser visualizados na Tabela 11. Nessa tabela é possível identificar correlações que variam entre forte ($|0,6| < r \leq |0,9|$) e muito forte ($|0,9| < r < |1|$), sendo a menor observada entre os pontos C e D

Tabela 11 - Matriz de correlação de Pearson para os valores de Temperatura Média Radiante no dia 15 de abril de 2024.


	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
Ponto A	1	0,895	0,87	0,933
Ponto B		1	0,982	0,922
Ponto C			1	0,865
Ponto D				1



Por fim, a Tabela 12 mostra os resultados obtidos para o último dia de coleta. As correlações variam entre forte ($|0,6| < r \leq |0,9|$) e muito forte ($|0,9| < r < |1|$), sendo a menor observada entre os pontos A e C. A Tmr é fortemente influenciada pela radiação solar direta e, para esse dia, as correlações entre os dados desse dia foram menores em alguns pontos. Isso pode ser explicado pela maior presença de nuvens que foi observada, diminuindo a quantidade de radiação recebida. Além disso, as projeções de sombras também podem ter influenciado, pois as diferentes estações do ano afetam o ângulo do sol em relação à Terra, o que pode aumentar ou diminuir os efeitos de sombra nas superfícies em diferentes locais.

Tabela 12 - Matriz de correlação de Pearson para os valores de Temperatura Média Radiante no dia 17 de julho de 2024.

	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
Ponto A	1	0,975	0,768	0,926
Ponto B		1	0,81	0,908
Ponto C			1	0,791
Ponto D				1



Neste contexto, é possível identificar que a intensidade das correlações entre os pontos para a temperatura do ar (T_a) e para a temperatura média radiante (T_{mr}) apresentam algumas diferenças. Isso ocorre porque a intensidade da T_{mr} é mais influenciada por fatores ambientais específicos, como a presença de sombras, edificações e nuvens, em comparação à T_a . Como os pontos de medição estão localizados em áreas com diferentes características, essas variações nas condições locais resultam em padrões distintos nas correlações observadas entre os pontos. Em um estudo realizado em Vancouver (Canadá), Tooke *et al.* (2011) relata que as sombras projetadas por árvores com diferentes morfologias reduzem a radiação direta recebida, assim, indo no mesmo caminho dos os efeitos citados acima.

Nos dois primeiros dias, as correlações são mais fortes, enquanto no terceiro dia os resultados apresentam relações mais fracas, principalmente para a T_{mr} . Isso acaba refletindo dos resultados do teste ANOVA, para as médias, onde apenas para T_{mr} do último dia tivemos diferenças significativas. Assim, a correlação indica que o padrão de aquecimento e resfriamento segue a mesma tendência em todos os pontos analisados ao decorrer do dia.

4.2 ANÁLISE DOS QUESTIONÁRIOS

Os questionários foram aplicados simultaneamente às medições para a coleta de dados meteorológicos. Ao todo, foram realizados 183 questionários durante os três dias de medições, sendo 53 respondidos por mulheres e 132 por homens. Foram diversos países de origem das pessoas que responderam ao questionário, entre eles estavam Alemanha, Angola, Brasil, Brasil, Espanha, Itália e Portugal, sendo que a maioria era proveniente do Brasil e Portugal. Por se tratar de uma praça, os respondentes estavam em trânsito, com nível de atividade relativamente similar, ou seja, caminhando ($MET = 1,5$).

4.2.1 Análises estatísticas

Inicialmente, com as respostas obtidas foi realizado o teste de Kruskal-Wallis. Para uma melhor interpretação, o teste foi aplicado em um conjunto de diferentes variáveis de agrupamento em relação a um grupo de variáveis de teste. A Tabela 13 exemplifica a forma que os grupos foram distribuídos.

Tabela 13 – Distribuição das variáveis para aplicação do teste de Kruskal-wallis.

Teste	Variável de agrupamento	Variáveis de teste
Teste 1	Sensação térmica	Roupa
		Temperatura do Ar
		Percepção de temperatura do ar
		Humidade Relativa
		Velocidade do ar
		Temperatura Média Radiante
Teste 2	Circulação do ar	Roupa
		Temperatura do ar
		Percepção de temperatura do ar
		Humidade Relativa
		Velocidade do ar
		Temperatura Média Radiante
Teste 3	Requisitos de adaptação	Roupa
		Temperatura do Ar
		Percepção de temperatura do ar
		Humidade Relativa
		Velocidade do ar
		Temperatura Média Radiante
Teste 4	Humidade	Roupa
		Temperatura do Ar
		Percepção de temperatura do ar
		Humidade Relativa
		Velocidade do ar
		Temperatura Média Radiante

O primeiro teste, foi realizado com o objetivo de comparar a relação entre as variáveis de teste meteorológicas e a variável de agrupamento de sensação térmica, tendo sido igualmente considerada uma variável pessoal, o nível de vestuário (Clo). Pela aplicação do teste de Kruskal-wallis foi possível observar que houve diferenças significativas para as variáveis: Roupa, $H(5) = 36,87$, $P < 0,001$; Temperatura do ar, $H(5) = 62,24$, $P < 0,001$; Percepção de temperatura do ar, $H(5) = 47,74$, $P < 0,001$; Humidade, $H(5) = 69,63$, $P < 0,001$; e Temperatura média radiante, $H(5) = 61,02$, $P < 0,001$.

Pese embora alguma dispersão, os dados de Temperatura do ar apresentam um padrão de comportamento coerente com os da percepção de conforto. Assim, verifica-se que com o aumento da temperatura existe uma evolução da sensação térmica, de 2 (Frio), associada a temperaturas mais baixas, até à sensação 7 (Muito quente), associada a temperatura mais altas (Figura 4.9).

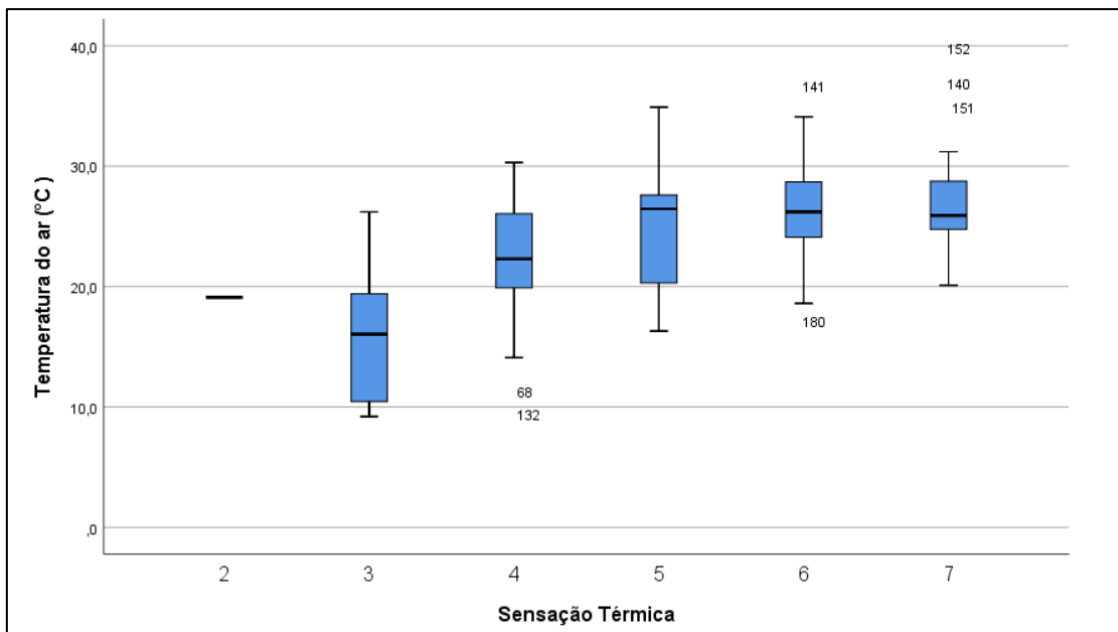


Figura 4.9 – Representação diagrama de caixas para a Temperatura do ar no local e a Sensação térmica.

Para a Humidade relativa, observa-se o oposto, com um padrão de comportamento decrescente à medida que a sensação térmica aumenta (Figura 4.10). No entanto, não foi possível identificar um padrão consistente para a roupa, pois as respostas não criavam uma clara relação com a variável de sensação térmica, o que reforça a perspectiva de o vestuário poder constituir um elemento de ajuste da sensação térmica, condicionando a percepção de conforto térmico.

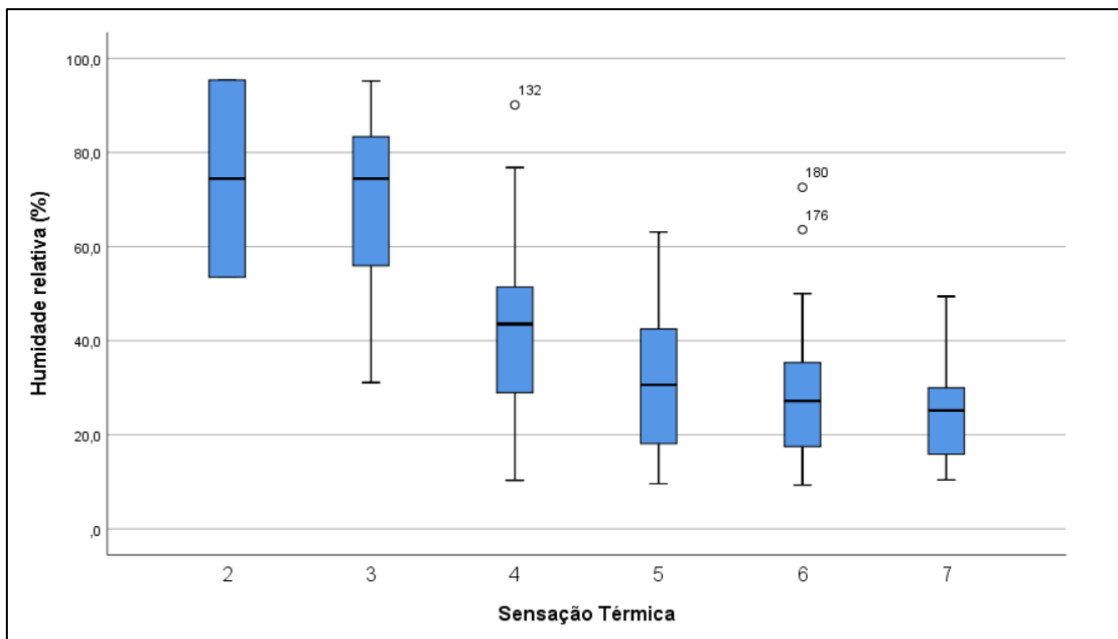


Figura 4.10 – Representação diagrama de caixas entre a Humidade relativa do local e a Sensação térmica.

O segundo teste foi realizado com o objetivo de avaliar os dados das variáveis de teste meteorológicas e sua relação com a variável de agrupamento de Circulação do ar. Os resultados demonstraram que houve diferenças estatisticamente significativas apenas para a variável de Percepção de temperatura do ar, $H(4) = 10,73$, $P = 0,038$. Essa análise indica que as pessoas percebem diferenças de Temperatura do ar com base na Circulação do ar. Isso influencia como os indivíduos sentem o ambiente em relação a temperaturas altas ou baixas, mesmo quando as demais variáveis de teste não apresentam mudanças significativas.

No terceiro teste, a análise foi realizada utilizando a variável de agrupamento de Requisitos de adaptação. Assim, com os resultados foi possível verificar que houve diferenças significativas para as seguintes variáveis de teste: Temperatura do ar, $H(4) = 21,59$, $p < 0,001$; Percepção de temperatura do ar, $H(3) = 22,68$, $P < 0,001$; Humidade, $H(4) = 24,86$, $P < 0,001$; Velocidade do ar, $H(4) = 10,38$, $P = 0,034$; e Temperatura média radiante, $H(5) = 18,44$, $P = 0,001$. Mais uma vez, não foi possível identificar um padrão para a escolha de roupa, sugerindo que as condições testadas não influenciam na quantidade ou tipo de vestuário.

O quarto teste foi realizado com o objetivo de avaliar os dados das variáveis de teste meteorológicas e sua relação com a variável de agrupamento de Percepção de Humidade. Neste contexto, foram identificadas diferenças estatisticamente significativas para quase todas as variáveis do teste, com exceção da Velocidade do ar. Assim, tivemos os seguintes resultados: Roupa, $H(4) = 9,78$, $P = 0,044$; Temperatura do ar, $H(4) = 30,73$, $P < 0,001$; Percepção de temperatura do ar, $H(4) = 18,93$, $P = 0,001$; Humidade, $H(4) = 31,58$, $P < 0,001$; Velocidade do ar, $H(4) = 3,11$, $P = 0,539$; e Temperatura média radiante, $H(4) = 22,64$, $P < 0,001$.

Para este teste, foi possível identificar um padrão de comportamento em todas as variáveis de teste, sendo que o mais consistente foi testada na variável de Temperatura do ar. O padrão encontrado foi decrescente, desde a percepção de humidade - Muito seco (1) está associada a temperaturas mais elevadas, diminuindo até ao Muito húmido (5) que está associado a temperaturas mais baixas. A figura 4.11 apresenta os dados da dispersão dos resultados através de um diagrama de caixas.

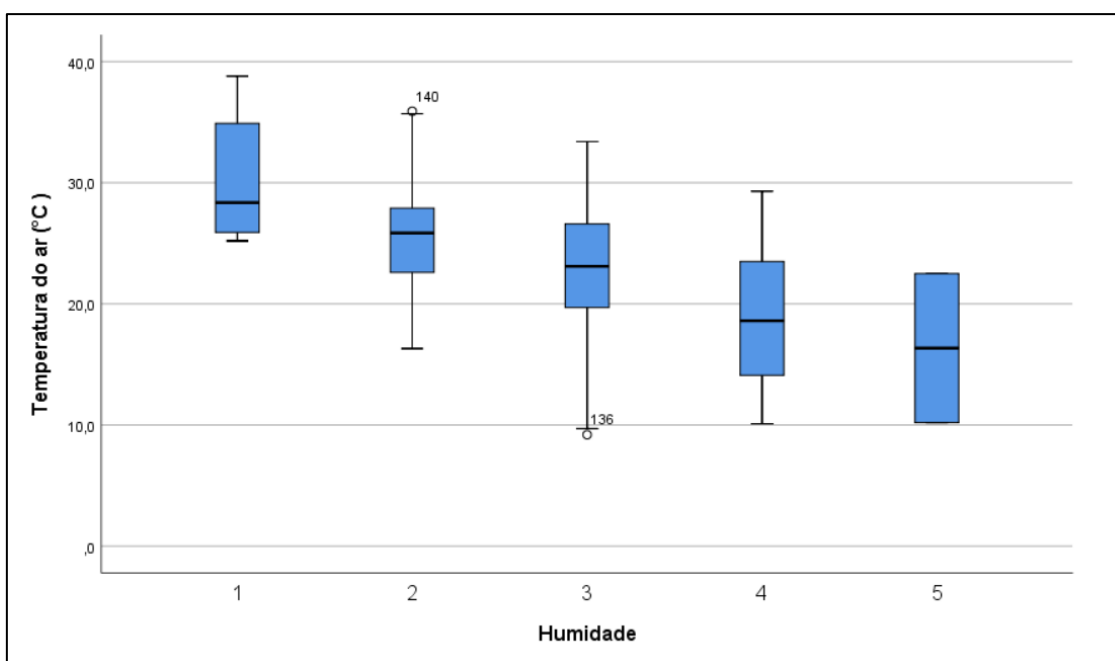


Figura 4.11 – Representação diagrama de caixas da Temperatura do ar real e a percepção de Humidade.

4.2.2 Comportamento das variáveis

As principais variáveis utilizadas para avaliar a percepção de conforto térmico dos indivíduos foram: a Sensação térmica, Temperatura do ar, Velocidade do ar e a Humidade relativa. Com uma análise cuidadosa dos dados, considerando os horários e as temperaturas, foi possível realizar algumas interpretações.

As respostas indicando sensação térmica de "Fresco" foram mais frequentes nos horários entre 6 horas e 9 horas e entre 19 horas e 21 horas, com algumas variações entre os dias. Isso ocorre nos períodos iniciais e finais do dia, quando as Temperaturas do ar eram mais baixas, conforme observado anteriormente. À medida que o dia avançava, a sensação térmica aumentava gradualmente.

Os horários mais críticos em relação à sensação térmica correram durante a tarde, entre 12 horas e 18 horas, quando a maioria das respostas indicou percepções de calor variando de "Quente" a "Muito Quente". Contudo, no primeiro dia, esse comportamento já foi observado a partir das 10:30 horas. Nesses períodos, a Temperatura do ar atingiu níveis mais altos e registrou-se baixa Humidade relativa, fatores que, combinados, aumentam o desconforto térmico. A Figura 4.12 ilustra esse comportamento da sensação térmica, utilizando uma escala de 1 a 7, onde 1 indica "Muito frio", 4 indica "Neutro" e 7 indica "Muito quente".

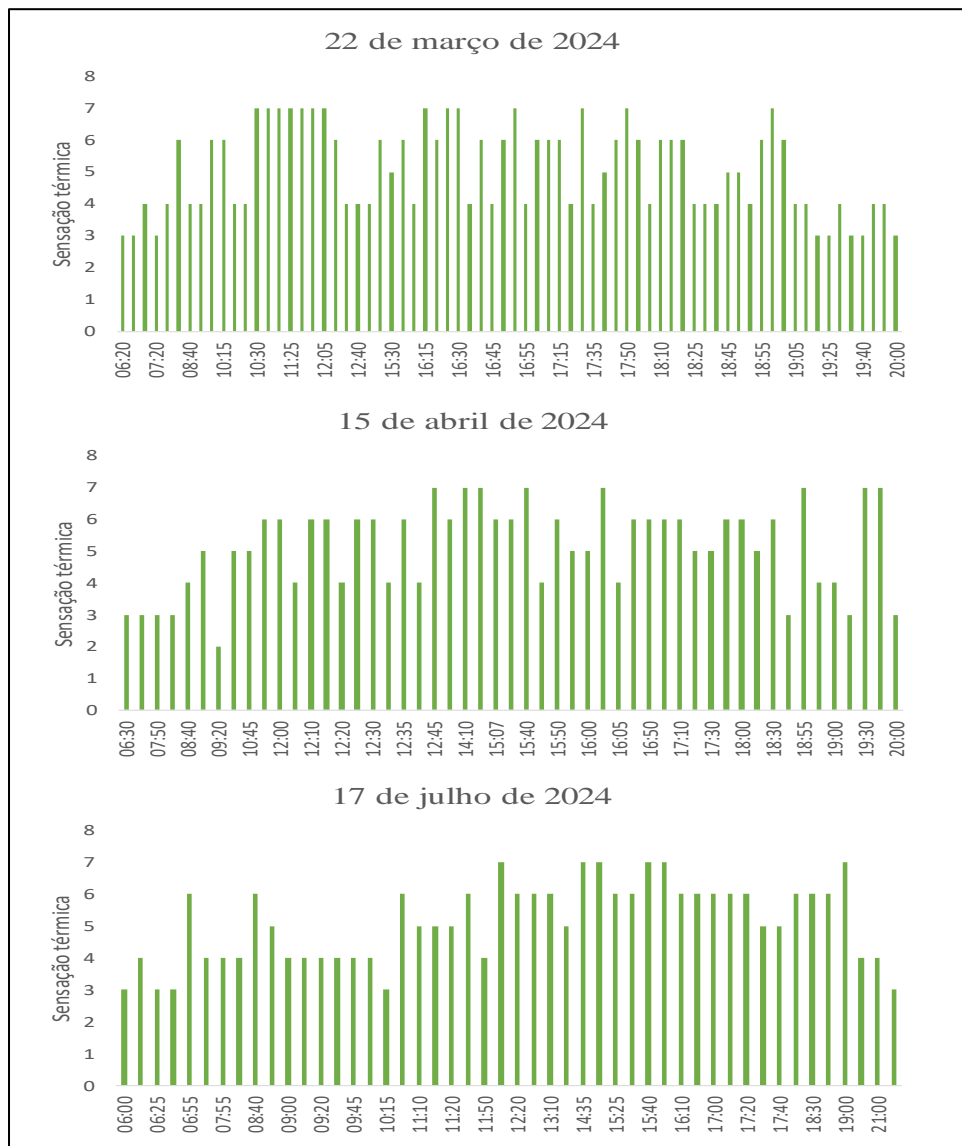


Figura 4.12 – Comportamento da percepção de Sensação térmica ao longo do dia, nos três dias de medição.

Como visto anteriormente, um ambiente confortável situa-se habitualmente entre 21°C à 27°C (Olgyay, 1963). A sensação térmica neutra é indicada pelo valor 4, e a maioria das respostas se concentra entre 20°C e 27°C, o que é ilustrado na Figura 4.9. Isso significa que, nessas condições, as pessoas experimentavam uma sensação térmica agradável, sem percepção de frio ou calor. Em relação à Humidade relativa, um ambiente confortável situa-se entre 30% a 65%. O comportamento é o mesmo, onde a condição de neutralidade se encontra entre 30% e 50%, que também é ilustrado na Figura 4.10. Isso reforça a validade e a relevância dos dados obtidos pelos questionários, demonstrando ainda que essas variáveis influenciam diretamente o conforto térmico pessoal.

4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Com os dados coletados e os cenários criados, foi possível realizar as simulações no software ENVI-met para os três dias de medições, e assim, entender um pouco mais sobre as condições da Praça Camões. As simulações nos dão resposta das estimativas de Temperatura do Ar, Temperatura Média Radiante, Humidade Relativa e Velocidade do ar.

Os valores de temperatura do ar registrados, no ponto B, no primeiro dia e no ponto C, durante o meio dia solar do segundo dia, não foram usados para validação. Da mesma forma, para a temperatura média radiante, os valores dos pontos B, D e E também não passaram por validação. Esses dados não foram utilizados devido a falhas nas microestações meteorológicas durante esses períodos de monitorização, no caso do ponto E, os sensores não incluem a recolha da temperatura média radiante.

4.3.1 Cenário base simulado

Utilizando o software ENVI-Met, foi possível simular a situação atual da Praça Camões. Para isso, foram inseridos como valores de entrada do modelo as médias máximas e mínimas de Temperatura do ar e Humidade relativa, obtidas por estações microclimáticas fixas. Assim, o software relaciona o modelo e suas características com os valores máximos e mínimos de cada horário e calcula os resultados para cada hora do dia. O sensor do ponto D está situado na mesmo local que a estação fixa, que é representada pelo ponto E, isso faz com que os dados dos dois pontos sejam os mesmos de acordo com as simulações.

A maior Temperatura do ar no primeiro dia foi de 27,5°C às 14 horas nos pontos D e E. Já o ponto C registrou a menor temperatura às 6 horas, com 13,7°C. No segundo dia, a temperatura mais baixa permaneceu no ponto C, com 13,7°C às 7 horas, enquanto a temperatura mais alta foi novamente registrada nos pontos D e E, chegando a 27,5°C, embora em horário diferente, 4 horas. No final, no terceiro dia, os pontos D e E continuaram a deter a temperatura mais alta, que foi de 33,7°C às 16 horas. O ponto C registrou novamente a temperatura mais baixa, 19,1°C às 6 horas.

Em relação a Temperatura Média Radiante, no primeiro dia, o ponto C registrou a temperatura mais alta, 73,9°C, às 13 horas, enquanto o ponto A registrou a temperatura mais baixa, 8,2°C, às 6 horas. No segundo dia, o ponto C registrou a maior T_{mr}, de 73,4°C às 12 horas, enquanto o ponto B registrou a mais baixa de 9,2°C às 6 horas. O ponto C voltou a registrar a maior T_{mr}, no terceiro dia, medindo 76,1°C às 13 horas, enquanto os pontos A e B tiveram as temperaturas mais baixas, ambos medindo 14,2°C às 5 horas.

O comportamento das Temperaturas ao longo dos três dias apresentaram semelhanças, com os valores máximos e mínimos ocorrendo nos mesmos pontos em cada um dos dias analisados. No entanto, o padrão de horários apresentou pequenas variações, o que pode ser atribuído às diferentes épocas do ano em que os dados foram coletados, sendo influenciadas por fatores como a posição do sol devido à rotação terrestre.

Durante os períodos da manhã, onde foram registradas as Temperaturas do ar mais baixas entre os pontos, ao observar o comportamento da praça no geral, é possível identificar que as temperaturas mais elevadas nesse horário concentram-se nas áreas próximas aos edifícios, o que vai se modificando ao longo do dia. O estudo de Ambrosini *et al.* (2014), realizado em Teramo (Região de Abruzzo, Itália), ao analisar a possível formação de Ilha de Calor Urbano e a avaliação de sua magnitude utilizando o software ENVI-met, mostra que as maiores Temperaturas do ar para o início da manhã são registradas ao redor dos edifícios, devido à menor liberação de calor das superfícies que acontecem durante a período noturno, assim, reforçando o comportamento que foi encontrado no presente estudo. Esse padrão pode ser observado nos Anexos B, C e D.

4.3.2 Cenário alternativo simulado

O cenário alternativo foi simulado com recurso aos mesmos dados que foram utilizados para o cenário base, num contexto espacial que foi alterado para contemplar a introdução de vegetação. Os pontos D e E tiveram a maior Temperatura do ar no primeiro dia, medindo 26,6°C às 14 horas, enquanto as localidades B e C tiveram a menor, medindo 13,6°C às 6 horas. No segundo dia, os pontos D e E registraram novamente as maiores temperaturas, atingindo 27,1°C às 16 horas, enquanto o ponto C registrou a temperatura mais baixa, 14,6°C às 6 horas. Por fim, no terceiro dia, a maior temperatura do dia foi registrada nos pontos D e E às 16 horas, com 32,9°C, enquanto a temperatura mais baixa foi registrada no ponto C às 6 horas, sendo ela 19,1 °C.

Para a Temperatura média radiante, no primeiro dia, o pico máximo da foi registrado no ponto C, com 72,2°C às 13 horas, enquanto o valor mínimo foi observado no ponto B, com 8,1°C às 6 horas. No segundo dia, a maior temperatura foi novamente no ponto C, registrando 71,3°C às 14 horas, e o valor mínimo foi registrado no ponto B, com 9,2°C às 6 horas. Finalmente, no terceiro dia, o ponto C alcançou a maior temperatura média radiante, com 75,1°C às 14 horas, enquanto a menor temperatura foi mais uma vez registrada no ponto B, com 14,2°C às 5 horas.

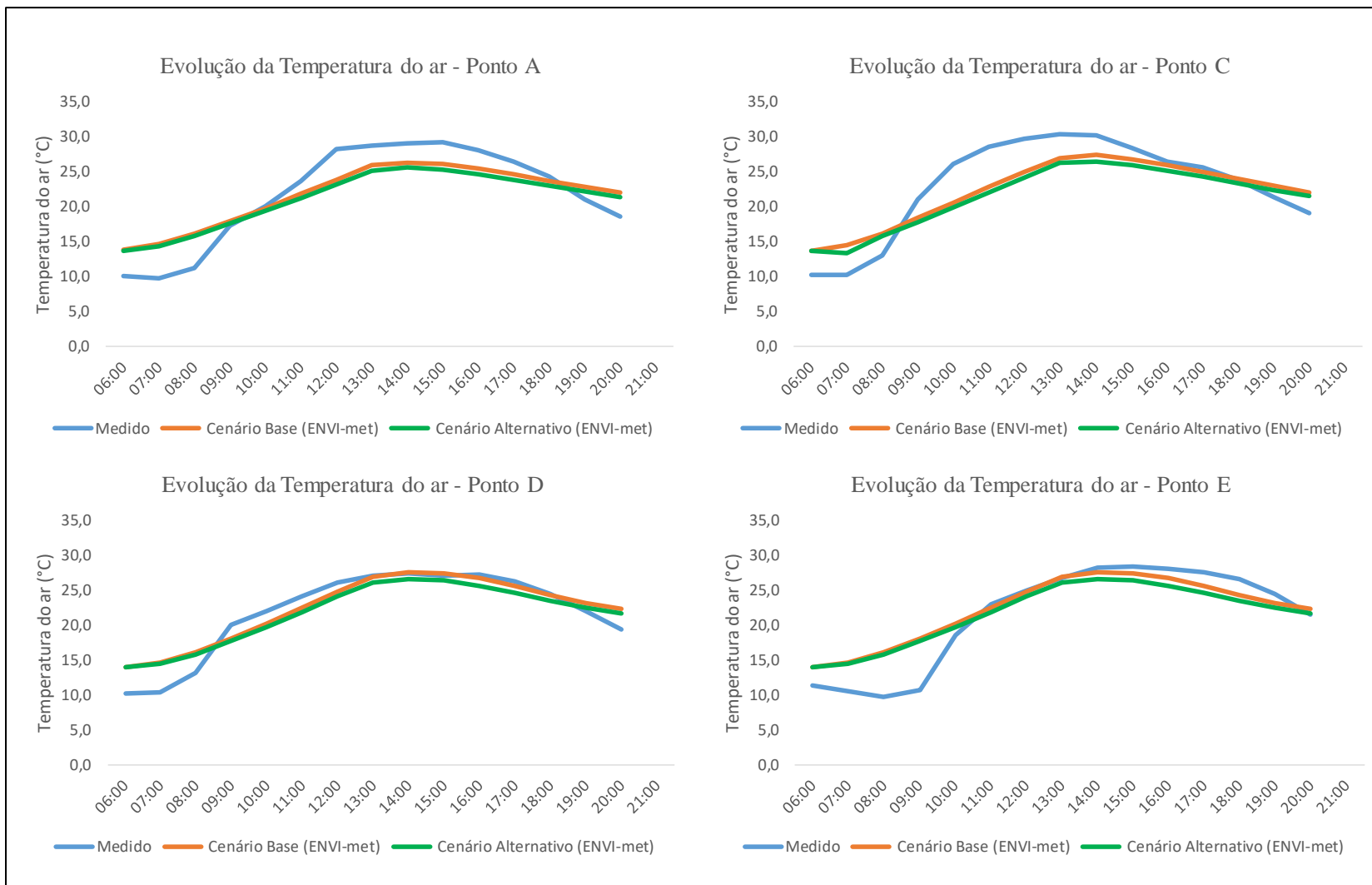
Para o cenário simulado, é possível assinalar o mesmo comportamento das temperaturas que foi identificado no cenário base, em que as maiores temperaturas no início da manhã estão localizadas ao redor dos edifícios. A visualização desse comportamento pode ser feita através dos Anexos E, F e G.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE A MONITORIZAÇÃO E OS CENÁRIOS SIMULADOS

Com intuito de entender o comportamento das variáveis ao longo do dia e realizar a validação dos modelos através de correlações, foi efetuada uma comparação entre todos os dados obtidos através dos equipamentos de medição e os dados resultantes da simulação como software ENVI-met.

4.4.1 Comparações para o dia 22 de março de 2024

Foram utilizadas três fontes de dados para a realização das comparações; dados medidos através das estações micrometeorológicas de conforto térmico, resultados do cenário base e resultados do cenários alternativo. Deve salientar que os sensores situados no ponto B sofreram falhas no dia, impossibilitando a coleta de dados. A Figura 4.13 mostra a comparação das curvas do comportamento da Temperatura do ar ao longo do dia em quatro pontos.



Figuras 4.13 - Evolução da Temperatura do ar nos períodos de medição, para os pontos medidos, e os resultantes da simulação do cenário base e do cenário alternativo no dia 22 de março de 2024.

Ao analisar a imagem, é possível constatar que as a curvas de Temperatura do ar (Ta) dos dados medidos, cenário base e cenário alternativo para cada ponto apresentam variações semelhantes. Durante o período da manhã é possível identificar um rápido aumento da temperatura em todos os pontos, seguido de uma estabilização durante a tarde até seu decaimento, mais lento, ao final do dia.

A curva do cenário base é a que mais se aproxima da curva dos dados medidos. As maiores proximidades acontecem no durante a tarde e noite. Esse comportamento é parecido ao do estudo de Rosseti (2013), cujo objetivo era avaliar os efeitos de uma ilha de calor na cidade de Cuiabá (Brasil) por meio de simulações no software ENVI-met. Durante a validação do modelo ENVI-met, que seguiu o mesmo método de comparação utilizado neste trabalho, foram observadas grandes semelhanças nos resultados de temperatura do ar durante os períodos citados.

Os resultados do cenário alternativo, com a inclusão das Soluções Baseadas na Natureza (SBNs), mostram que a Ta teve um decréscimo quando comparados ao cenário base, devido a inclusão de vegetação no local. Johansson & Emmanuel (2006), ao estudarem os fatores que influenciam o conforto térmico, mostraram que soluções como grandes copas de árvores, passarelas cobertas e toldos aumentam o sombreamento e apresentam efeitos positivos semelhantes na melhoria do conforto térmico.

Dessa forma, comparações mostram que os dados medidos e os dados do cenário base são semelhantes e apresentam um comportamento próximo em boa parte de dia. Isso aponta para uma boa confiabilidade do cenário modelado para fins de validação.

Para uma validação ainda mais expressiva do modelo criado no ENVI-met é essencial avaliar o grau de associação entre os dados. Para isso, a normalidade entre os dados medidos e os dados dos resultados da simulação para o cenário base foi confirmada, e em seguida, foi realizada a análise pela matriz de correlação de Pearson para a Temperatura do ar. A Tabela 14 mostra os resultados obtidos após a análise estatística.

Tabela 14 – Matriz de correlação Pearson entre os dados medidos (Ta (M)) e os dados simulados no ENVI-met (Ta (CB)) para o cenário base para cada ponto para o dia 22/03/2024.

	Ta A (CB)	Ta C (CB)	Ta D (CB)	Ta E (CB)
Ta A (M)	0,924			
Ta C (M)		0,816		
Ta D (M)			0,913	
Ta E (M)				0,969

Todos os valores da diagonal principal são positivos e próximos de 1, onde o ponto C apresenta a menor correlação. Apesar desse desvio no ponto C, os resultados indicam correlações direta e estatisticamente significativas, trazendo ainda mais validade ao modelo.

Para dar continuidade ao estudo e criar dados mais confiáveis para a comparação, as diferenças entre os resultados foram analisadas. Deste modo, foram calculadas as variações de Temperatura do ar (Ta) e Temperatura Média Radiante (Tmr) em cada ponto para todos os horários. Foi feita a subtração entre o conjunto de dados medidos pela monitorização microclimática (M) e o cenário base (CB). As Tabelas ilustram os resultados obtidos.

Tabela 15 – Diferença da Temperatura do ar entre o medido (M) e cenário base (CB) para o dia 22/03/2024.

Horário	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
	ΔT_a (°C)				
	M-CB	M-CB	M-CB	M-CB	M-CB
06:00	-3,8	-	-3,4	-3,8	-2,8
07:00	-4,9	-	-4,3	-4,3	-4,1
08:00	-4,9	-	-3,1	-2,9	-6,4
09:00	-0,6	-	2,8	1,9	-7,4
10:00	0,3	-	5,6	1,7	-1,6
11:00	1,8	-	5,7	1,7	0,5
12:00	4,5	-	4,8	1,4	0,2
13:00	2,9	-	3,4	0,1	-0,2
14:00	2,7	-	2,8	-0,2	0,7
15:00	3,1	-	1,6	-0,2	1,0
16:00	2,6	-	0,6	0,5	1,4
17:00	1,8	-	0,7	0,7	1,9
18:00	0,5	-	-0,2	0,1	2,2
19:00	-1,8	-	-1,6	-1,2	1,3
20:00	-3,4	-	-2,9	-2,8	-0,7

Ao avaliar as diferenças de Ta (Tabela 15), os resultados mostraram que os valores medidos (M) para o início da manhã e fim da tarde são menores que os valores CB. Por outro lado, durante a tarde, a diferença é positiva, mostrando que os valores de medidos (M) são mais elevados que os valores de CB. Isso indica que o ENVI-met tende a superestimar os resultados de Ta durante o período da manhã e noite, e a subestimar os resultados durante o período da tarde, como também foi visto nos gráficos. Nesse dia, a maior diferença negativa foi de -7,4, às 09:00 horas no ponto E, enquanto que a maior diferença positiva foi de 5,7, às 11:00 horas no ponto C.

Tabela 16 - Diferença da Temperatura Média Radiante entre o medido (M) e cenário base (CB) para o dia 22/03/2024.

Horário	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
	ΔT_{mr} (°C)			
	M-CB	M-CB	M-CB	M-CB
06:00	-1,0	-	-4,0	-
07:00	-1,9	-	-4,0	-
08:00	-19,0	-	-8,5	-
09:00	-1,2	-	-14,7	-
10:00	0,9	-	-6,0	-
11:00	0,9	-	-5,1	-
12:00	-5,7	-	-4,4	-
13:00	-8,4	-	-6,4	-
14:00	-11,9	-	-14,6	-
15:00	-14,0	-	7,3	-
16:00	-13,8	-	2,6	-
17:00	10,4	-	0,1	-
18:00	6,7	-	-1,0	-
19:00	0,9	-	-2,8	-
20:00	-1,2	-	-3,8	-

A T_{mr} apresentou um comportamento em que os valores medidos (M) foram inferiores aos do CB por um período mais prolongado (Tabela 16). O software ENVI-met não simula a variação na presença de nuvens acessionais durante o dia, podendo interferir de forma significativa nos resultados dependendo das condições do dia. Embora tenha sido um dia com o céu predominantemente descoberto, nuvens ocasionais podem ter motivado com que as temperaturas medidas sejam inferiores que as temperaturas do cenário base por um tempo maior.

4.4.2 Comparações para o dia 15 de abril de 2024

Nesse dia, o sensor situado no ponto C sofreu com alguns problemas, impossibilitando o registro de dados durante o período da tarde, o que limitou a comparação das curvas nesse local. A Figura 4.14 mostra a comparação das curvas do comportamento da temperatura do ar ao longo do dia em quatro pontos distintos.

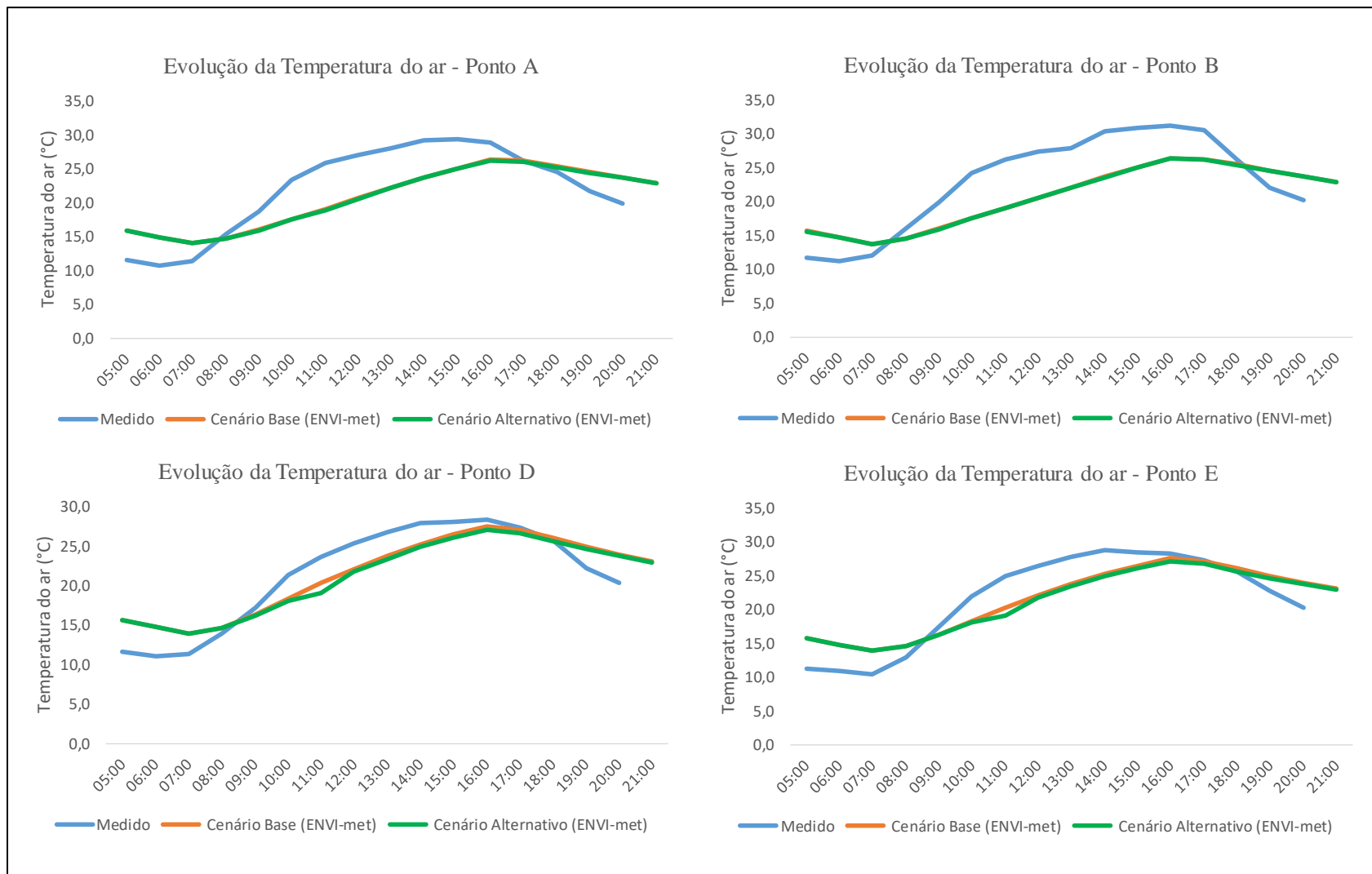


Figura 4.14 – Evolução da Temperatura do ar nos períodos de medição, para os pontos medidos, e os resultantes da simulação do cenário base e do cenário alternativo no dia 15 de abril de 2024.

Neste dia, o padrão de aquecimento é semelhante, porém as curvas dos valores medidos apresentam um maior desvio em relação às curvas dos cenários base, quando comparado ao primeiro dia. É possível identificar seu rápido crescimento no período da manhã, uma estabilização durante a tarde, e o decaimento ao final do dia. O ponto D e E apresentam uma maior proximidade das curvas, principalmente do período da tarde.


A curva do cenário alternativo, que inclui a presença das SBNs, é bastante próxima da curva do cenário base, mas permanece ligeiramente abaixo ao longo de todo o dia. Isso mostra que, no geral, a vegetação contribui para a redução da temperatura, mantendo a temperatura do CB superior à do CA durante todo o dia.

Essa semelhança entre as curvas em todos os pontos demonstra que os valores simulados estão próximos dos valores medidos pelas estações de conforto térmico e pelo sensor fixo, aumentando a confiabilidade do modelo criado para sua validação.

Deste modo, igual ao primeiro dia, o grau de associação entre os dados foi analisado para uma validação ainda mais expressiva do modelo criado no ENVI-met. Assim, a normalidade entre os dados medidos e os dados dos resultados do cenário alternativo foi testada, e em seguida, foi realizada a análise pela matriz de correlação de Pearson. Para esse dia foram encontradas as maiores diferenças no gráfico, e como consequência, as correlações de menor intensidade. A Tabela 17 mostra os resultados.

Tabela 17 - Matriz de correlação Pearson entre os dados medidos (Ta (M)) e os dados simulados no ENVI-met (Ta (CB)) para cada ponto para o dia 15/04/2024.

	Ta A (CB)	Ta B (CB)	Ta C (CB)	Ta D (CB)	Ta E (CB)
Ta A (M)	0,796				
Ta B (M)		0,820			
Ta C (M)			0,952		
Ta D (M)				0,918	
Ta E (M)					0,900



Aqui, todos os valores da diagonal principal que mostram a correlação entre a Temperatura do ar medida (Ta (M)) e a Temperatura do ar simulada (Ta (CB)), são positivos e próximos de 1, e de acordo com a Tabela 6, apresentam ligações forte ($|0,6| < r \leq |0,9|$) nos pontos A e B, e muito forte ($|0,9| < r < |1|$) nos pontos C, D e E. Assim, os resultados indicam correlações direta e estatisticamente significativas, trazendo ainda mais validado ao modelo. As correlações são mais fracas, reflexo do gráfico que apresenta maiores diferenças.

Com o intuito de gerar dados ainda mais confiáveis, a mesma análise das diferenças de temperatura realizada no primeiro dia foi repetida para o segundo. Os resultados obtidos foram bem parecidos com os resultados do dia anterior, e a Tabela 18 e 19 exemplifica todos os valores encontrados.

Tabela 18 - Diferença da Temperatura do ar entre o medido (M), cenário base (CB) para o dia 15/04/2024.

Horário	ΔT_a (°C)				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
	M-CB	M-CB	M-CB	M-CB	M-CB
05:00	-4,4	-3,9	-3,4	-4,1	-4,4
06:00	-4,1	-3,5	-2,9	-3,6	-3,7
07:00	-2,6	-1,7	-2,0	-2,5	-3,5
08:00	0,7	1,5	-	-0,7	-1,8
09:00	2,8	3,9	-	0,9	1,1
10:00	5,9	6,7	-	3,0	3,7
11:00	6,8	7,2	-	3,4	4,5
12:00	6,4	6,9	-	3,3	4,4
13:00	5,9	5,8	-	3,0	4,0
14:00	5,5	6,7	-	2,7	3,5
15:00	4,4	5,9	-	1,6	1,9
16:00	2,6	4,9	-	0,7	0,7
17:00	0,1	4,3	-	0,4	0,2
18:00	-0,8	0,7	-0,8	-0,2	-0,3
19:00	-2,7	-2,5	-2,9	-2,7	-2,2
20:00	-3,9	-3,5	-3,9	-3,6	-3,7

Na Tabela 18, os resultados para a T_a mostram que os valores medidos (M) são maiores que os valores do CB para o início da manhã e final da tarde, que incluem o nascer no sol e o pôr do sol. Esse resultado é muito semelhante ao resultado do primeiro dia. Aqui a maior diferença negativa foi de -4,4, às 05:00 horas nos pontos A e E, e a maior diferença positiva foi de 7,2, às 11:00 horas no ponto B.

Tabela 19 - Diferença da Temperatura Média Radiante entre o medido (M), cenário base (CB) para o dia 15/04/2024.

Horário	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
	ΔT_{mr} (°C)			
	M-CB	M-CB	M-CB	M-CB
05:00	1,7	-1,8	-4,6	-2,8
06:00	0,2	-0,5	-2,4	-1,8
07:00	-18,4	4,5	2,0	-0,6
08:00	-16,8	-12,3	-	10,6
09:00	-4,7	-1,1	-	-2,0
10:00	-4,1	5,0	-	2,4
11:00	-1,7	6,6	-	3,5
12:00	2,6	9,4	-	5,1
13:00	7,7	9,5	-	9,6
14:00	8,1	10,0	-	9,1
15:00	6,2	3,8	-	5,5
16:00	4,2	2,9	-	-0,8
17:00	37,5	-1,6	-	4,8
18:00	33,1	17,7	15,1	27,0
19:00	6,6	2,9	-1,8	0,0
20:00	-0,1	-0,4	-4,3	-4,2

O comportamento da T_{mr} (Tabela 19) apresenta maiores diferenças tanto nos dados positivos como negativos. Novamente a T_{mr} apresentou um comportamento onde os valores medidos (M) foram inferiores aos do CB por um período mais prolongado, principalmente no ponto A. É mais difícil encontrar um comportamento padrão. No entanto, no período da tarde, existe uma predominância onde as temperaturas medidas são maiores que as temperaturas simuladas.

4.4.3 Comparações para o dia 17 de julho de 2024

Da mesma forma que para os dias anteriores, os gráficos foram gerados com os dados do terceiro dia. A figura 4.15 mostra a comparação das curvas para o comportamento da temperatura do ar ao longo do dia nos pontos A, B, C, D e E.



Figura 4.15 - Evolução da Temperatura do ar nos períodos de medição, para os pontos medidos, e os resultantes da simulação do cenário base e do cenário alternativo no dia 17 de julho de 2024.


Os gráficos deste dia se apresentam mais alongados em comparação com os restantes dos dias de medição. No entanto, ainda é possível observar um crescimento nas temperaturas durante a manhã, seguido de uma estabilização à tarde e um declínio no início da noite. As curvas mostram novamente que o software tende a superestimar os valores pela manhã e a subestimar no período da tarde.

Apesar de apresentar um comportamento semelhante ao dos dias anteriores, os gráficos para esse dia ainda mostram uma maior proximidade entre as curvas, indicando que tivemos simulações mais próximas das condições reais. Diante disso, fica ainda mais evidente que na comparação das curvas para todos os pontos, existe uma proximidade dos valores simulados com os valores medidos pelas estações de conforto térmico e do sensor fixo, reforçando a confiabilidade do modelo.

Assim, para uma melhor interpretação com o intuito de validação, o grau de correlação dos dados foi verificado. Desta forma, a normalidade entre os dados medidos e os dados dos resultados do cenário alternativo foi testada, e em seguida, foi realizada a análise pela matriz de correlação de Pearson. A Tabela 20 mostra os resultados.

Tabela 20 - Matriz de correlação Pearson entre os dados medidos (Ta (M)) e os dados simulados no ENVI-met (Ta (CB)) para cada ponto para o dia 17/07/2024.

	Ta A (CB)	Ta B (CB)	Ta C (CB)	Ta D (CB)	Ta E (CB)
Ta A (M)	0,917				
Ta B (M)		0,945			
Ta C (M)			0,945		
Ta D (M)				0,989	
Ta E (M)					0,941



Novamente, todos os valores da diagonal principal, que indicam a correlação entre a Temperatura do ar medida (Ta (M)) e a Temperatura do ar simulada (Ta (CB)), são positivos e próximos de 1. Conforme mostrado na Tabela 6, esses valores refletem correlações muito forte ($|0,9| < r < |1|$). Portanto, os resultados sugerem correlações direta e estatisticamente significativas, o que reforça ainda mais a validade do modelo.

Seguindo o mesmo padrão que foi usado para as análises dos dias anteriores, foi feito o cálculo das diferenças de temperatura entre os dados medidos, cenário base e do cenário alternativo. A Tabela 21 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 21 - Diferença da Temperatura do ar entre o medido (M) e cenário base (CB) para o dia 17/07/2024.

Horário	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
	ΔT_a (°C)				
	M-CB	M-CB	M-CB	M-CB	M-CB
04:00	-5,6	-4,2	-4,7	-4,2	-11,0
05:00	-5,3	-4,1	-4,2	-3,8	-10,0
06:00	-3,7	-3,4	-2,8	-3,3	-8,7
07:00	-1,2	-1,2	-2,4	-3,0	-5,6
08:00	0,9	1,0	-1,4	-1,7	-2,3
09:00	1,2	1,1	0,6	-1,1	-1,7
10:00	2,1	2,1	1,2	-0,7	-1,2
11:00	3,8	3,9	1,9	0,5	0,2
12:00	4,7	5,0	3,4	0,6	0,8
13:00	4,1	4,2	4,5	-0,2	1,9
14:00	3,7	4,4	4,9	-0,3	1,1
15:00	1,2	4,2	5,2	-0,2	0,1
16:00	0,8	3,6	0,7	-0,1	-0,8
17:00	0,8	3,9	-0,9	0,2	0,1
18:00	1,6	5,0	-0,7	1,5	0,3
19:00	2,5	1,3	-0,4	1,2	0,8
20:00	-1,2	-1,0	-1,4	-1,2	-2,6
21:00	-2,3	-1,9	-2,1	-2,2	-6,2

Por fim, é possível observar que o comportamento identificado nos primeiros dois dias (22 de março de 2024 e 15 de abril de 2024) ao analisar as diferenças de T_a entre os dados medidos (M) e os dados do CB se manteve também no terceiro dia (Tabela 21). A maior diferença negativa foi de -11,0, às 04:00 horas no ponto E, e a maior diferença positiva foi de 5,2, às 15:00 horas no ponto C.

Tabela 22 - Diferença da Temperatura Média Radiante entre o medido (M) e cenário base (CB) para o dia 17/07/2024.

Horário	Ponto A Ponto B Ponto C Ponto D			
	ΔT_{mr} (°C)			
	M-CR	M-CR	M-CR	M-CR
04:00	-0,4	2,2	-3,9	-2,2
05:00	-0,1	0,3	-1,7	-0,8
06:00	0,0	0,0	-1,2	-0,8
07:00	-17,4	-17,1	-0,4	1,0
08:00	-8,3	-8,0	-0,7	8,2
09:00	-14,8	-14,2	-3,0	-16,8
10:00	-6,8	-6,2	-14,1	-11,2
11:00	1,0	1,5	5,4	2,9
12:00	5,2	5,3	1,9	2,3
13:00	11,3	11,1	3,0	5,9
14:00	7,1	6,1	-2,8	5,7
15:00	5,1	4,2	25,9	-0,8
16:00	5,2	1,5	10,0	-0,7
17:00	4,9	0,6	-2,2	1,4
18:00	32,9	2,5	-1,6	0,4
19:00	24,5	11,2	-1,0	17,7
20:00	3,4	2,6	-1,1	-0,4
21:00	0,9	0,6	-2,1	-1,9

O comportamento da T_{mr} continua sendo instável, assim como observado nos dias anteriores. No estudo de Simon *et al.* (2018), é demonstrado que é possível adicionar condições de contorno, como céu limpo, ligeiramente nublado, parcialmente nublado e totalmente nublado na simulação, melhorando a representação das condições atmosféricas. No entanto, para o céu limpo, que eram as condições predominantes do dia, as nuvens ocasionais não são simuladas, o que pode explicar as diferenças observadas na Tabela 22.

No geral, os gráficos e tabelas mostram que, nos três dias analisados, para a T_a , foi possível identificar o mesmo comportamento do software ENVI-met. Os resultados evidenciam uma diferença negativa prolongada durante a manhã, indicando que as temperaturas no CB são superiores aos dos dados medidos (M). Já no período da tarde, ocorre uma inversão com uma diferença positiva, onde os valores medidos superam aqueles do CB.

De acordo com estudos como os de Yang et al. (2013) desenvolvido em Chuangzhou (China) e Duarte et al. (2015) em São Paulo (Brasil), essa variação está associada a uma tendência do software de superestimar as temperaturas durante a noite e ao amanhecer, subestimar os valores no período da tarde e, retornar a uma superestimação no período noturno.

Os gráficos também apresentam o mesmo padrão de comportamento, com um rápido aquecimento pela manhã, seguido de uma estabilização à tarde e um resfriamento no final do dia, formando uma curva decrescente. Comportamentos semelhantes foram observados nos estudos de Maggiotto *et al.* (2014), realizado em Lecce (Itália), que teve como objetivo validar os modelos ENVI-met e ADMS, e de Alves (2020), conduzido em Bragança (Portugal).

Nos três dias analisados, foram observadas semelhanças nas curvas, indicando que os valores simulados estão próximos dos valores medidos pelas estações de conforto térmico e pelo sensor fixo, o que aumenta a confiabilidade do modelo utilizado para validação. Um comportamento similar entre as curvas de valores medidos e simulados também foi identificado no estudo de Carfan (2011), que analisou o conforto térmico em áreas abertas em Ourinhos (Brasil). Apesar de se tratar de um contexto climático diferente de Bragança, o comportamento da simulação foi semelhante.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE O CENÁRIO BASE E ALTERNATIVO

O software ENVI-met permite retirar os dados em cada ponto, mas também, permite plotar mapas para entender a dinâmica e as diferenças em toda a área da praça. Todos os mapas plotados apresentam os resultados da diferença, em que os valores do CB são subtraídos ao CA, para os dias e períodos de simulação. Desta forma, os mapas foram plotados para uma melhor visualização das diferenças.

4.5.1 Comparações para a Temperatura do ar

No primeiro dia, levando em consideração o comportamento dos gráficos, diferenças relevantes ocorreram às 9 horas e às 15 horas. Por isso, os mapas foram gerados para esses horários e, também para às 18 horas. As Figuras abaixo apresentam os mapas para as diferenças na distribuição da Temperatura do ar.

Os mapas indicam diferenças na Ta entre o cenário base (CB) e o cenário alternativo (CA), em todos os períodos analisados. Os valores negativos representam uma redução de temperatura no CA em comparação ao CB, sendo ilustrado por uma paleta de cores que varia do marrom (Menores diferenças) ao azul-escuro (Maiores diferenças). Às 9 horas (Figura 4.16), o mapa mostra diferenças de temperatura entre 0,57°C e -0,61°C. Onde as maiores diferenças aconteceram pertos dos edifícios e das novas árvores que foram inseridas no cenário alternativo.

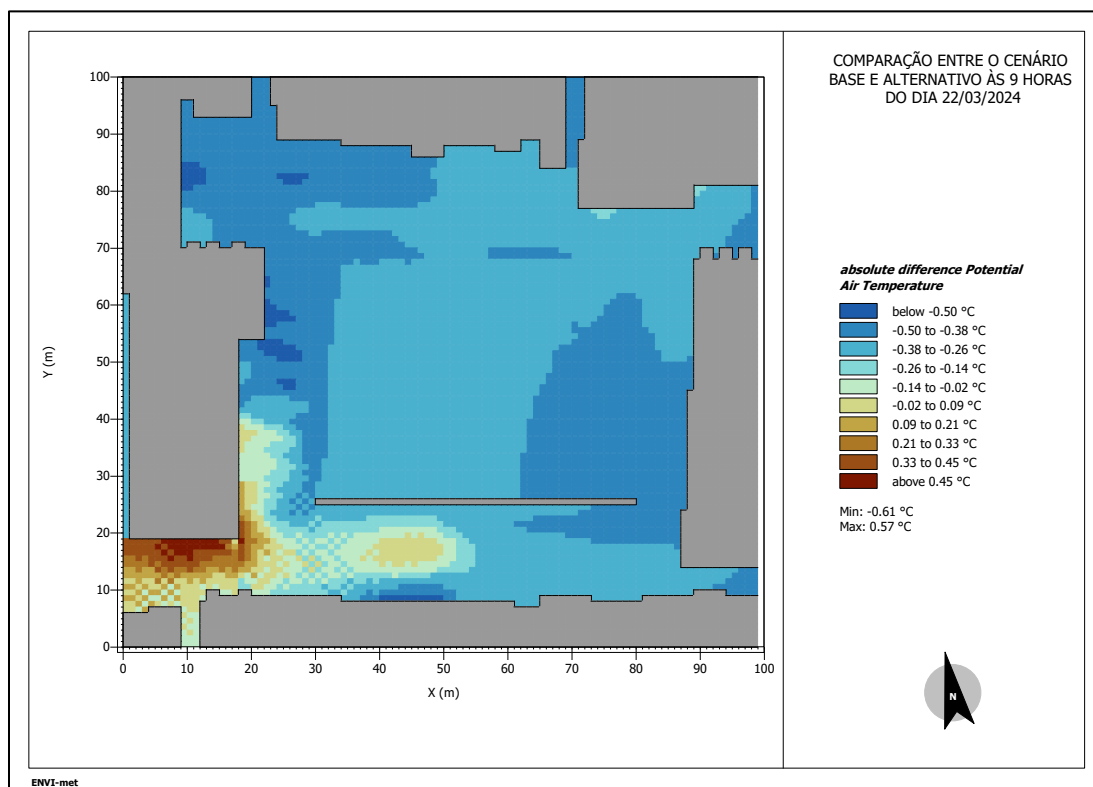


Figura 4.16 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 9 horas do dia 22 de março de 2024.

Às 15 horas (Figura 4.17), a Ta varia entre 1,13°C e -1,35°C. Novamente, as maiores reduções acontecem na proximidade de árvores introduzidas no CA, indicando a influência da vegetação. Uma área isolada continua apresentando aumento de temperatura, mas em menor extensão.

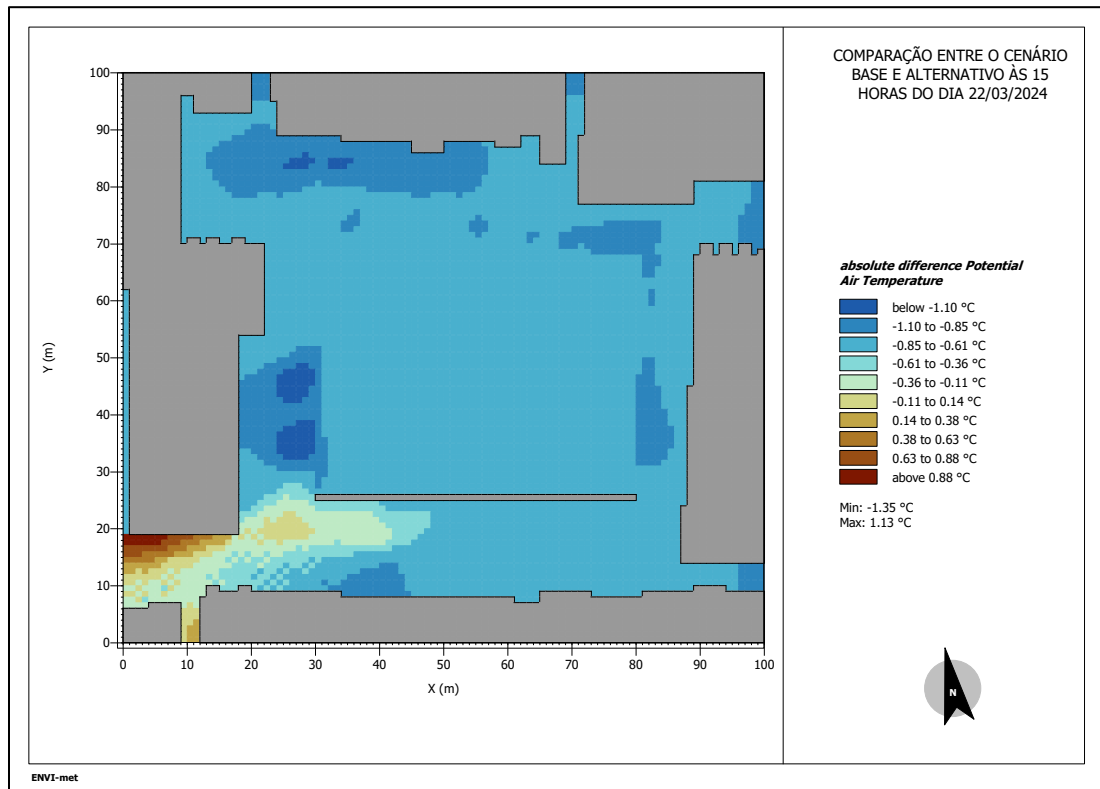


Figura 4.17 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 15 horas do dia 22 de março de 2024.

No último horário analisado, das 18 horas (Figura 4.18), o mapa mostra apenas diferenças negativas de temperatura entre os cenários, indicando que a Ta no CA esteve mais baixa que no CB em todos os pontos. As variações registradas ficaram entre $-0,65^{\circ}\text{C}$ e $-1,14^{\circ}\text{C}$. Durante o período analisado, na zona a Leste do mapa é um local onde se tem uma maior incidência de luz direta na superfície devido a orientação do sol, que está exposto a Oeste. Essa incidência é diminuída com a introdução da vegetação, fazendo com que esse local registre uma das maiores diferenças de Ta quando comparando aos cenários.

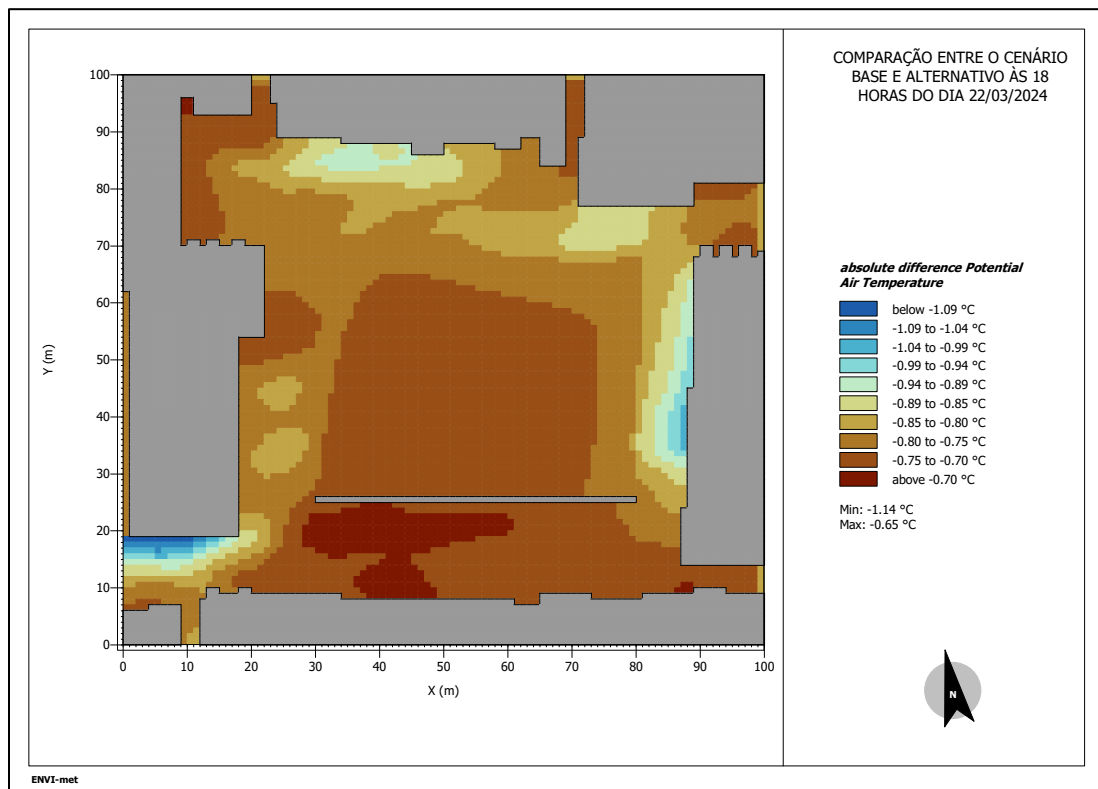


Figura 4.18 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 18 horas do dia 22 de março de 2024.

Para o segundo dia, os horários escolhidos para comparação foram um pouco diferentes, com isso os mapas foram plotados para às 9 horas, 15 horas e às 19 horas. As Figuras abaixo apresentam os mapas com a distribuição da Ta.

Os mapas mostram um comportamento que difere um pouco do primeiro dia. Para o primeiro horário, às 9 horas, foram encontradas diferenças que variam de 0,14°C à -0,30°C (Figura 4.19). Esses ganhos estão em locais bem específicas, principalmente na região onde se passa a rua, não interferindo muito nas condições gerais. As maiores diferenças estão localizadas na zona Oeste do mapa, em locais onde foram inseridos as novas espécies representando a *Liquidambar styraciflua*, que contribui para a redução da Ta no CA.

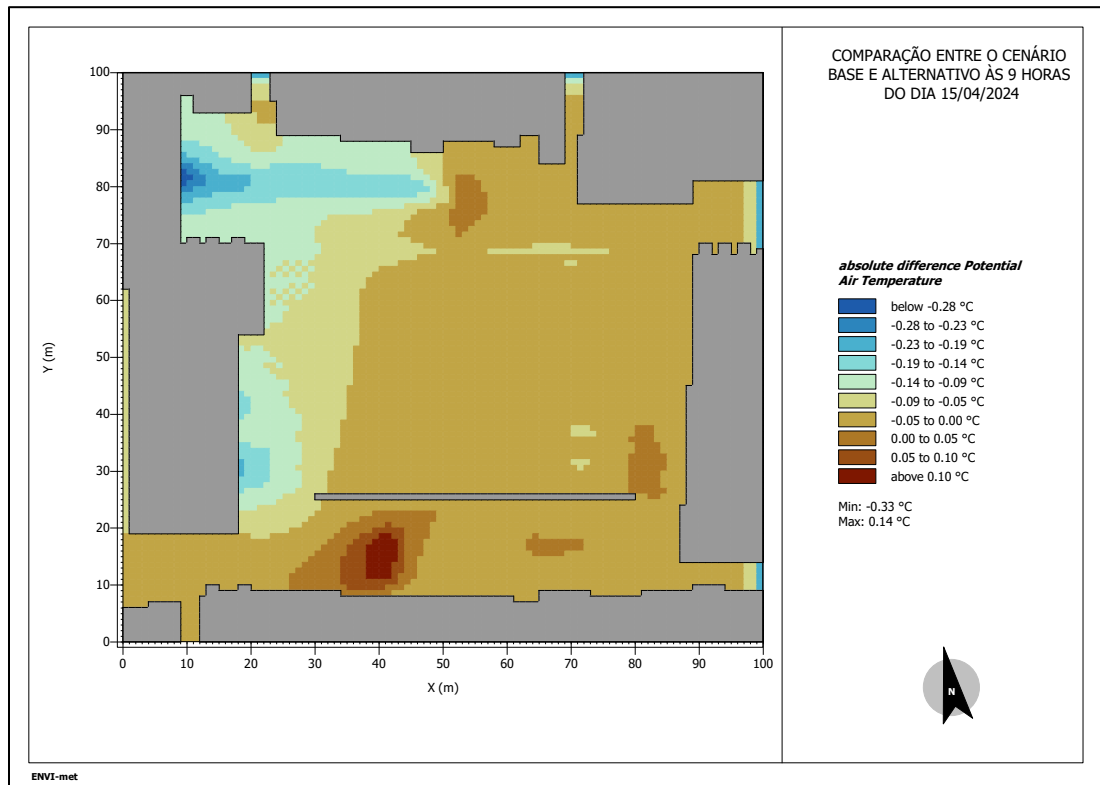


Figura 4.19 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 9 horas do dia 15 de abril de 2024.

Às 15 horas (Figura 4.20), é onde ocorre as maiores diferenças do dia ($0,08^{\circ}\text{C}$ a $-0,81^{\circ}\text{C}$), onde a introdução da vegetação continua apresentando um efeito positivo. Já às 19:00 horas (Figura 4.21), período com uma menor intensidade solar, as diferenças de temperatura variam de $-0,03^{\circ}\text{C}$ a $-0,30^{\circ}\text{C}$, reforçando que a presença de vegetação é um fator de redução térmica. As maiores diferenças acontecem também no lado Leste e Norte do mapa. Na zona Norte do mapa, foram inseridas novas espécies de árvores representando a *Liquidambar styraciflua*, enquanto na zona Leste, a introdução dos ciprestes (*Cupressus sempervirens*) criou novas áreas de sombra. Essas mudanças indicam um influência na redução de T_a , causando as maiores diferenças observadas nesse horário.

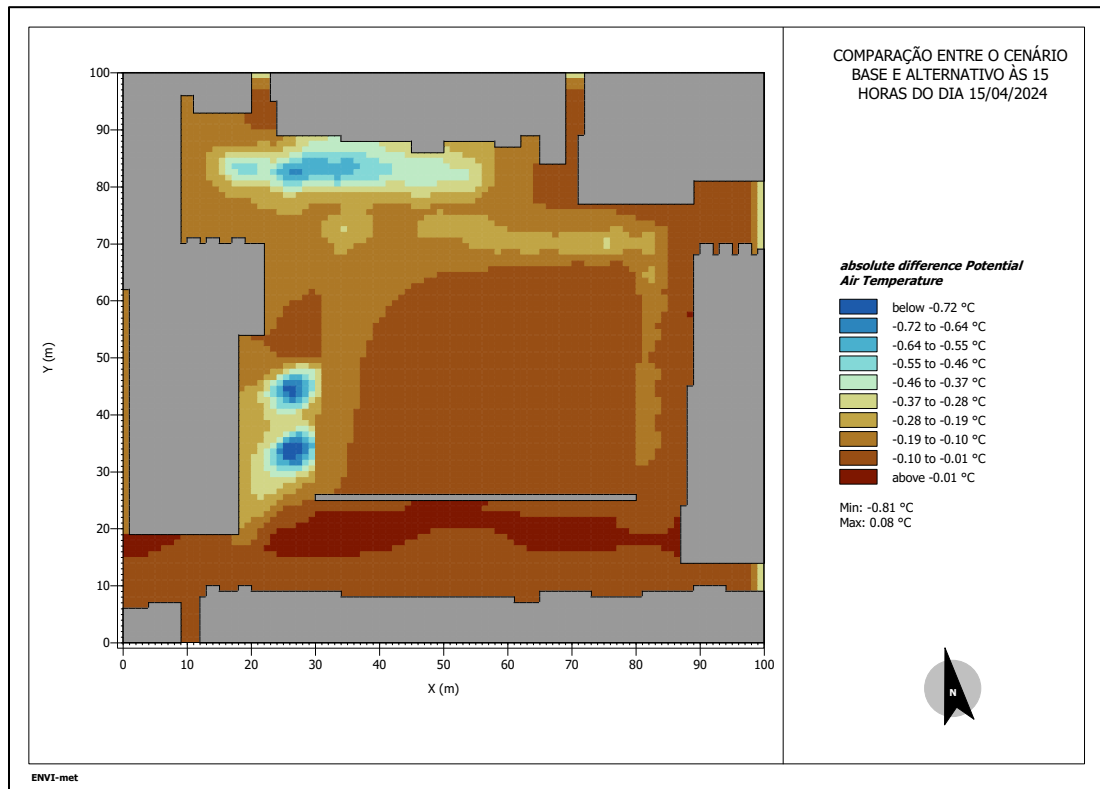


Figura 4.20 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 15 horas do dia 15 de abril de 2024

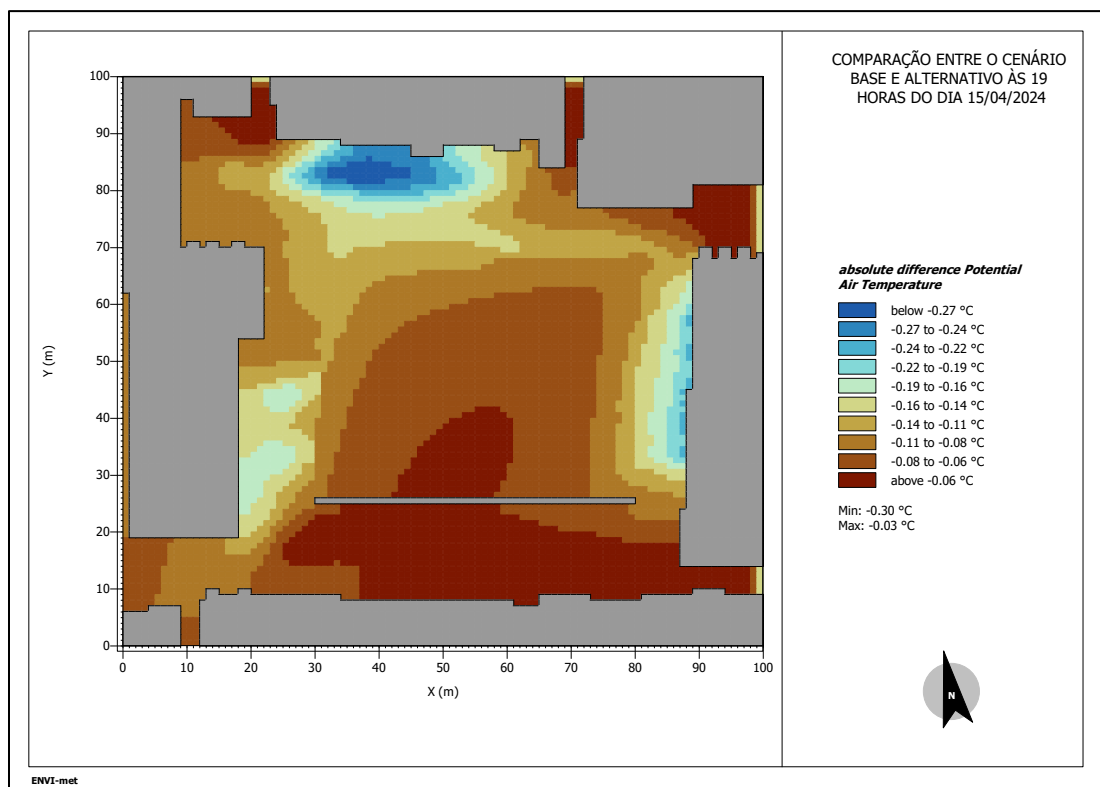


Figura 4.21 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 19 horas do dia 15 de abril de 2024.

Para o terceiro dia, as análises mostram a existência de diferenças relevantes às 10 horas e às 16 horas. Deste modo, os mapas foram gerados para esse horário e, também, para às 20 horas. Os mapas estão presentes nas Figuras abaixo.

No primeiro horário, às 10 horas, foi encontrada uma diferença relevante na Ta, com a presença pequenos acréscimos (Figura 4.22). As diferenças nos valores oscilaram entre os 0,21°C e os -2,29°C. A maior diferença foi localizada a esquerda (Oeste) do mapa, local onde foram projetas novas árvores, próximas da parede do prédio. Os locais próximos aos prédios tendem a ser mais quentes nesses horários devido a liberação de calor das superfícies.

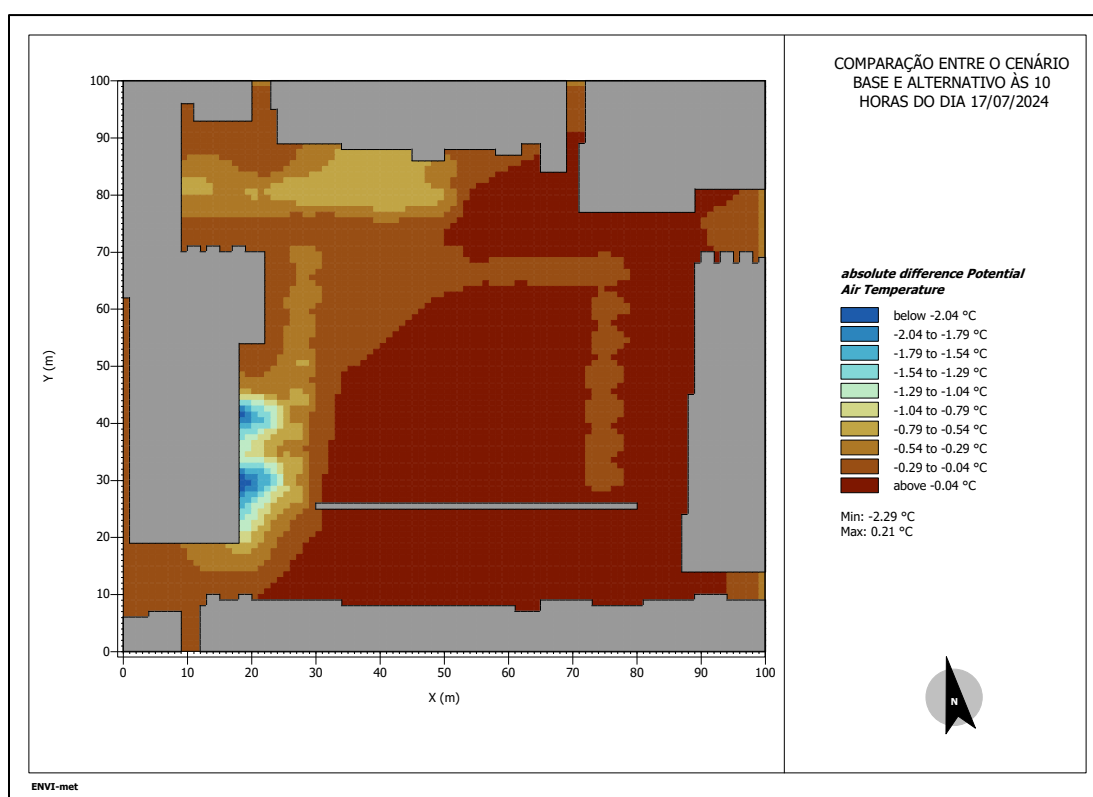


Figura 4.22 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 10 horas do dia 17 de julho de 2024.

Às 16:00 horas (Figura 4.23) e 20:00 horas (Figura 4.24), as diferenças variam entre 0,18°C e -1,11°C e de 0,02°C a -0,59°C, respectivamente, com as maiores reduções nas proximidades dos elementos de vegetação na zona norte, evidenciando os benefícios das intervenções propostas para o controle da Ta.

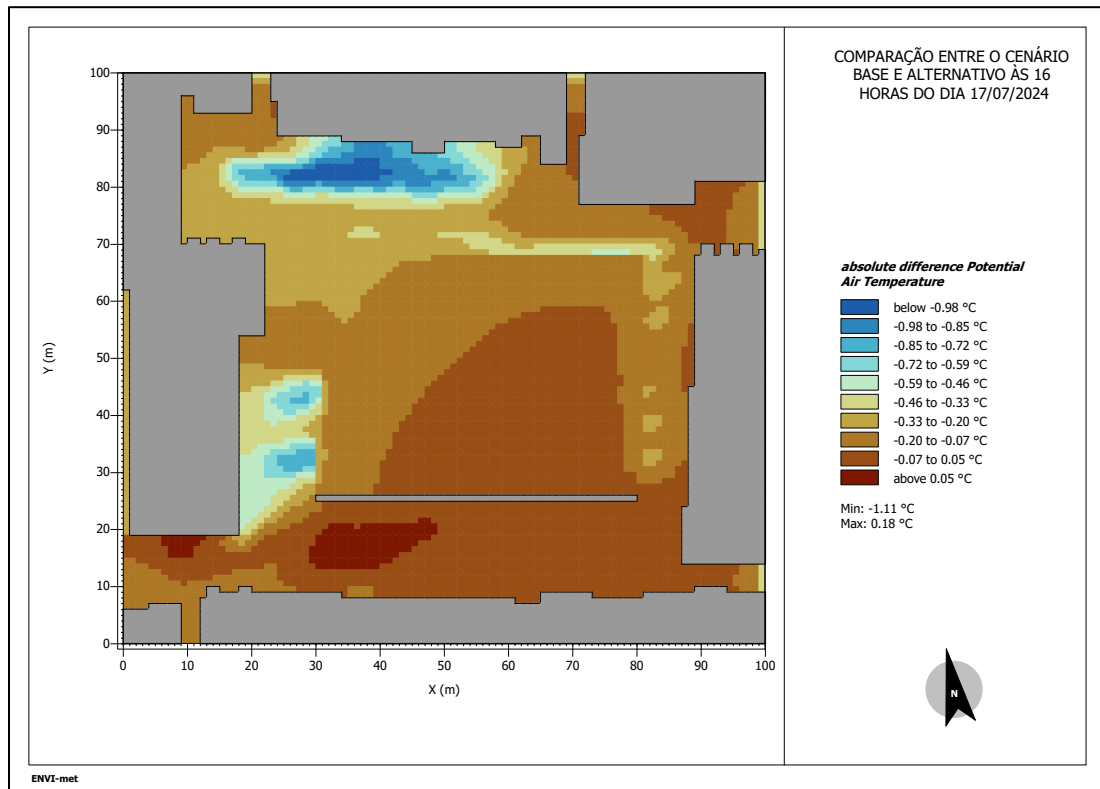


Figura 4.23 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 16 horas do dia 17 de julho de 2024.

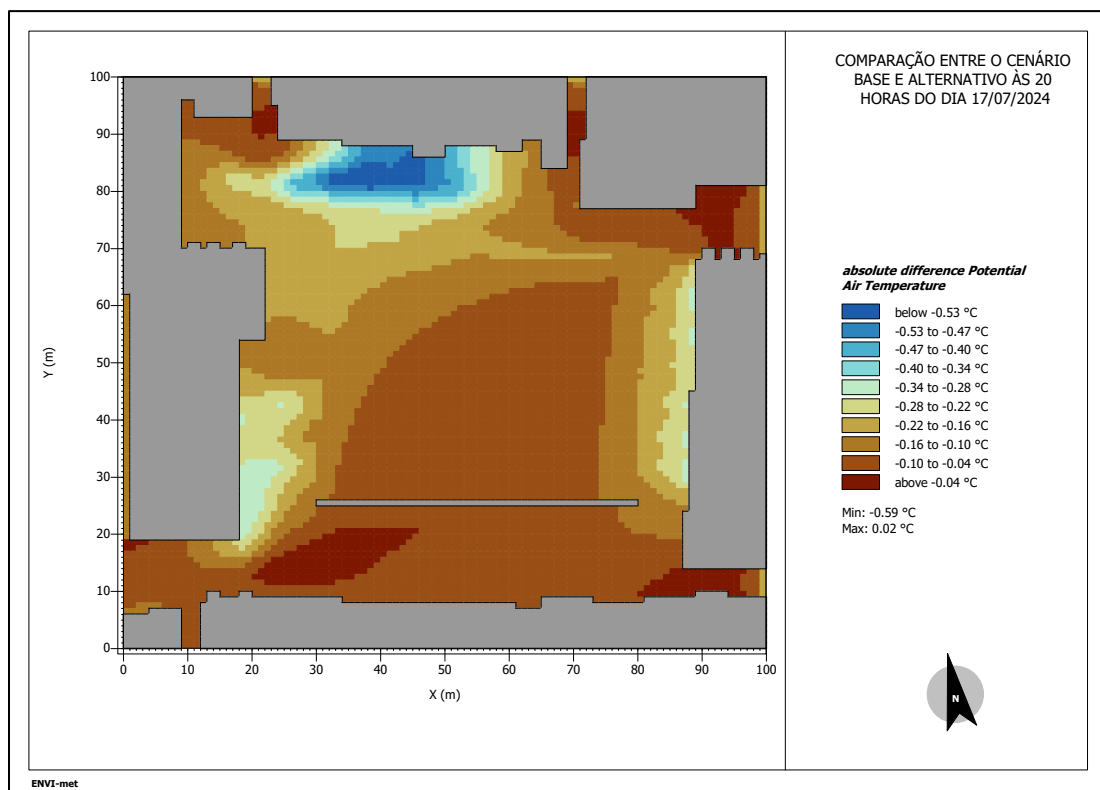


Figura 4.24 - Comparação das simulações de Temperatura do ar entre os cenários, às 20 horas do dia 17 de julho de 2024.

Globalmente os cenários mostram uma ligeira redução das temperaturas, com maiores diferenças no contexto da incorporação de novas árvores representando a *Liquidambar styraciflua* junto das árvores existentes na zonas Oeste e Norte da praça. Além disso, os novos exemplares de ciprestes (*Cupressus sempervirens*), que foram inseridos ao redor da zona central da praça, acabam gerando muitas sombras a zona Leste do mapa durante o período da tarde. Assim, a zona com maiores diferenças vai depender da altura do dia e da projeção da sombra das árvores.

As maiores diferenças de Ta aconteceram no período da tarde, com exceção do terceiro dia, que aconteceu no período da manhã. O período noturno, apesar de não apresentarem as maiores diferenças, foi o momento onde todos os pontos registraram menor temperatura no cenário alternativo em comparação ao cenário base, com todas as diferenças sendo negativas. Desta forma, a comparação entre os dados do CB e CA revelam um benefício na diminuição na Ta devido à implementação das Soluções Baseadas na Natureza (SBNs) para todos os dias simulados.

A Ta no CB é mais elevada que no CA, na maioria dos pontos e horários, com maior diferença nas áreas onde houve a inserção de vegetação, com uma redução que geralmente ficou em torno de -1°C . Essa análise é corroborada pelo estudo de Tsoka *et al.* (2018), que demonstrou que a presença de árvores urbanas pode reduzir a temperatura máxima em até $1,0^{\circ}\text{C}$ em média.

Também foram observados aumentos na Ta em alguns locais ao longo dos três dias. Isso pode ser explicado pelo fato de que as árvores reduzem a Velocidade do ar (Va) em certas áreas, resultando em um leve aumento de Ta. Ao utilizar o software ENVI-met para simular o microclima na cidade de Hashtgerd (Irã), Langer *et al.* (2012) identificaram que as árvores reduziram a Va em até $1,3\text{ m/s}$, assim, evidenciando o efeito das árvores na diminuição da Va.

4.5.2 Comparações para a Temperatura Média Radiante

Em relação a Temperatura Média Radiante (Tmr), para cada dia, foram utilizados os mesmo horários usados para a análise da Ta. Assim, no primeiro dia, os mapas foram plotados para as 9 horas, 15 horas e 18 horas. As Figuras abaixo apresentam os mapas com a distribuição da Tmr.

Assim, como no caso dos dados de T_a , os mapas também mostram diferenças para T_{mr} . Às 9 horas, as variações observadas vão de $1,14^\circ\text{C}$ a $-43,04^\circ\text{C}$ (Figura 4.25). Nesse horário, ocorre um aumento significativo de aquecimento devido à incidência solar, e as sombras projetadas pela nova vegetação na praça fazem com que seja registrada grandes diferenças para esta variável. O ganho mínimo de T_{mr} pode ser explicado pela mudança no comportamento do vento devido as alterações realizadas no cenário.

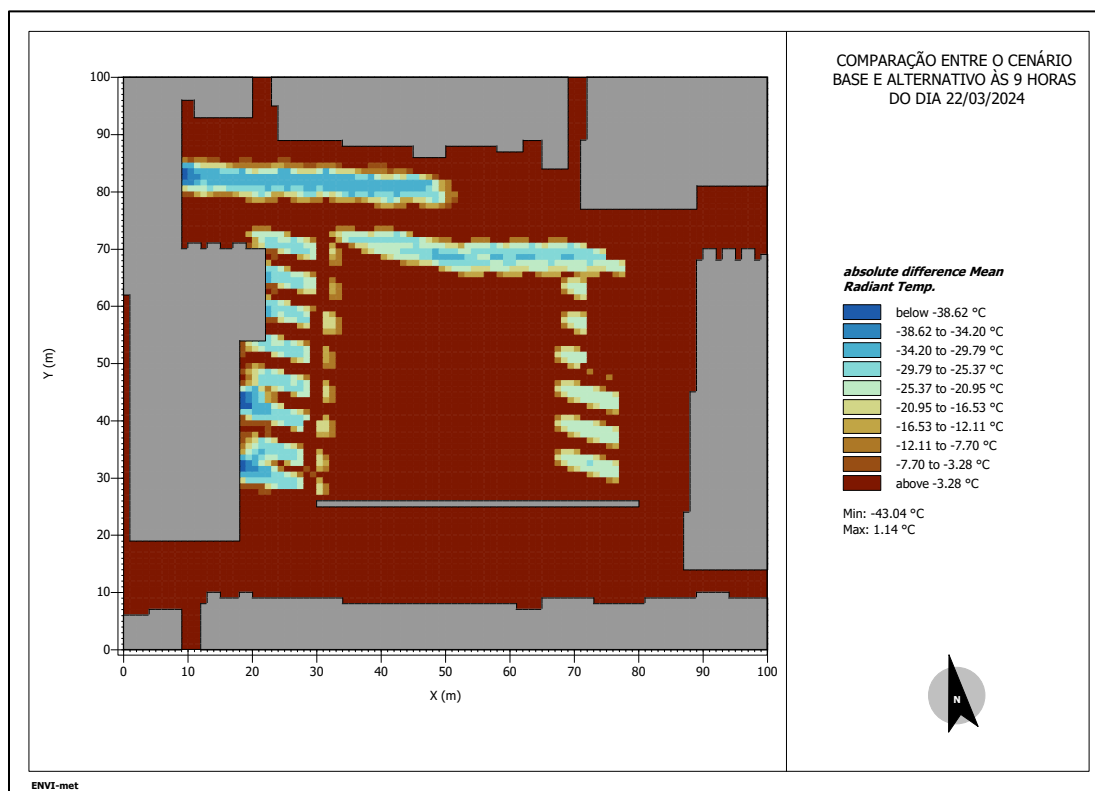


Figura 4.25 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 9 horas do dia 22 de março de 2024

Durante o período da tarde, mais precisamente as 15 horas, também ocorreu uma diminuição de T_{mr} do CA em relação CB (Figura 4.26). As diferenças variaram entre $1,16^\circ\text{C}$ e $-33,3^\circ\text{C}$. Para esse horário, existia uma grande presença de novas sombras projetadas devida a direção do sol em relação a terra, fazendo com que nessas locais também fossem registrados grandes diferença.

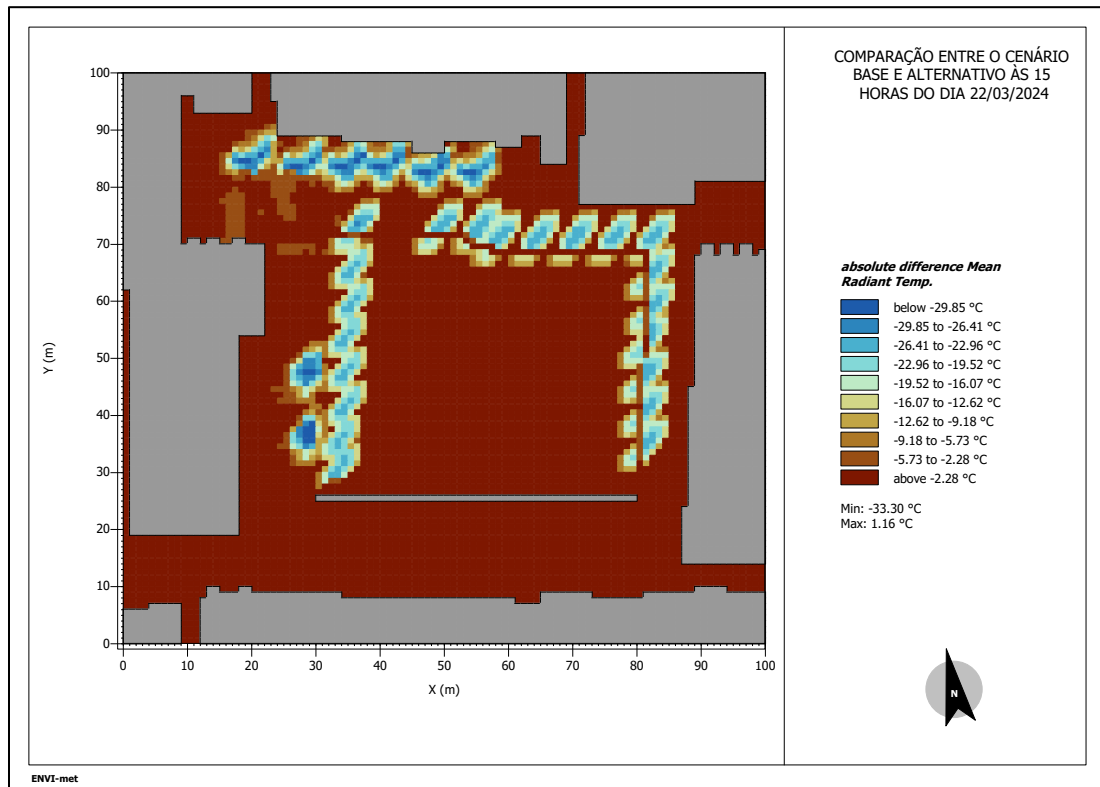


Figura 4.26 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 15 horas do dia 22 de março de 2024.

Por fim, na Figura 4.27 com último horário, as diferenças entre os cenários são menores, mas ao mesmo tempo, não é possível encontrar nenhum ganho de Tmr, indicando mais uma vez que a temperatura no CB é maior que a do CA em todos os pontos. Desta forma, as diferenças variam entre -0,07 °C e -8,22 °C. Essa menor diferença observada pode estar associada ao pôr do sol, quando as sombras no CA também aparecem no CB, uma vez que, nesse período, a maioria das sombras são projetadas pelos edifícios ao redor da praça. As maiores variações de Tmr, indicadas pelos tons de azul, concentram-se na mesma área onde foi registrada a maior diferença de Ta nesse horário, sendo ela localizada do lado leste do mapa.

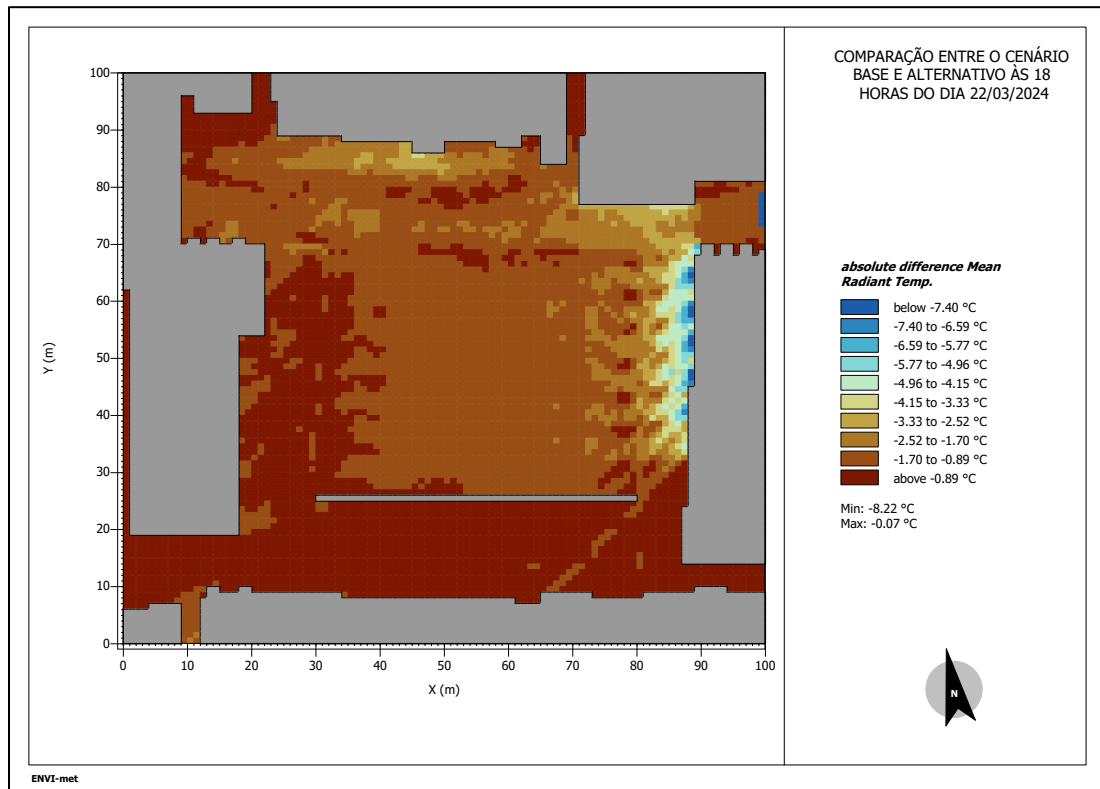


Figura 4.27 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 18 horas do dia 22 de março de 2024.

No segundo dia, os horários escolhidos foram às 9 horas, às 15 horas e às 19 horas. As Figuras abaixo apresentam os mapas com a distribuição da Tmr. Nesse dia, houve grandes diferenças absolutas na Tmr, indicando, mais uma vez, uma alteração positiva com as novas condições do CA. Para às 9 horas, as diferenças variaram de 2,29°C a -46,55°C (Figura 4.28). Novamente, as maiores diferenças estão localizadas em pontos próximos as SBNs implementadas.

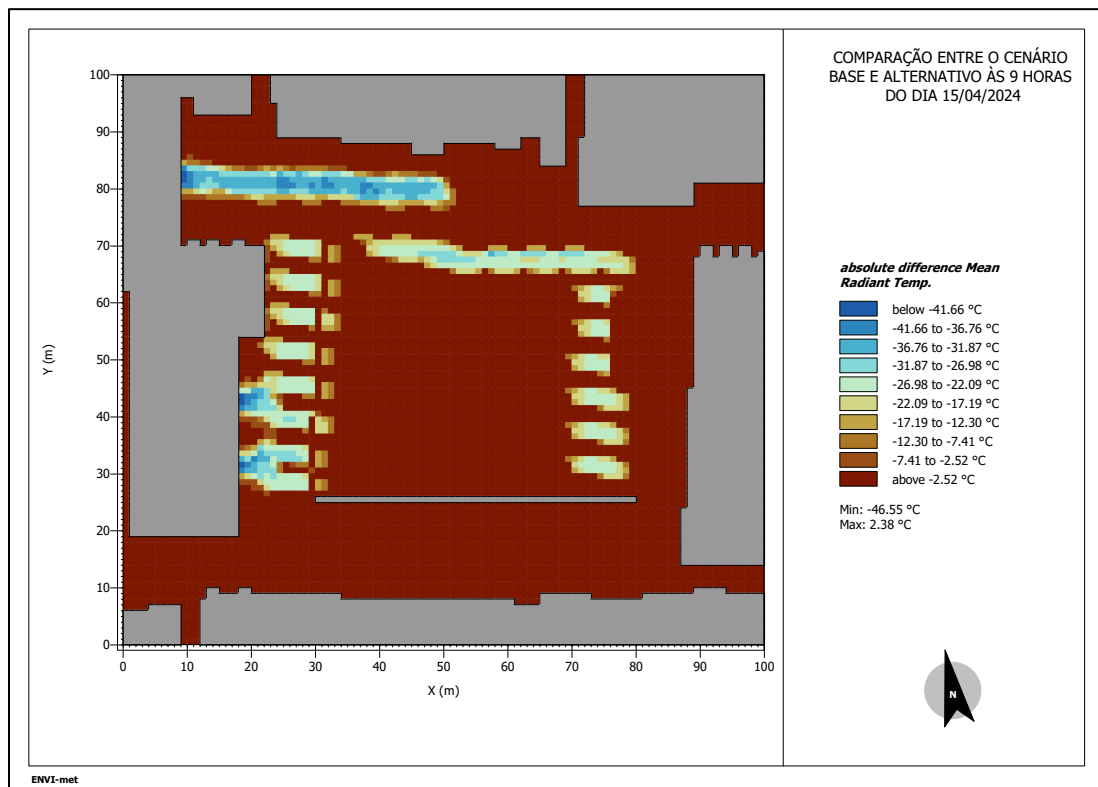


Figura 4.28 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 9 horas do dia 15 de abril de 2024.

Às 15 horas (Figura 4.29) e 19 horas (Figura 4.30), as diferenças de temperatura variam de 1,61°C a -36,19°C e de 1,42°C a -3,39°C, respectivamente. As maiores reduções foram registradas próximas aos elementos de vegetação que foram acrescentados e na parte Leste do mapa, reforçando mais uma vez os benefícios das intervenções propostas para a melhoria do conforto térmico.

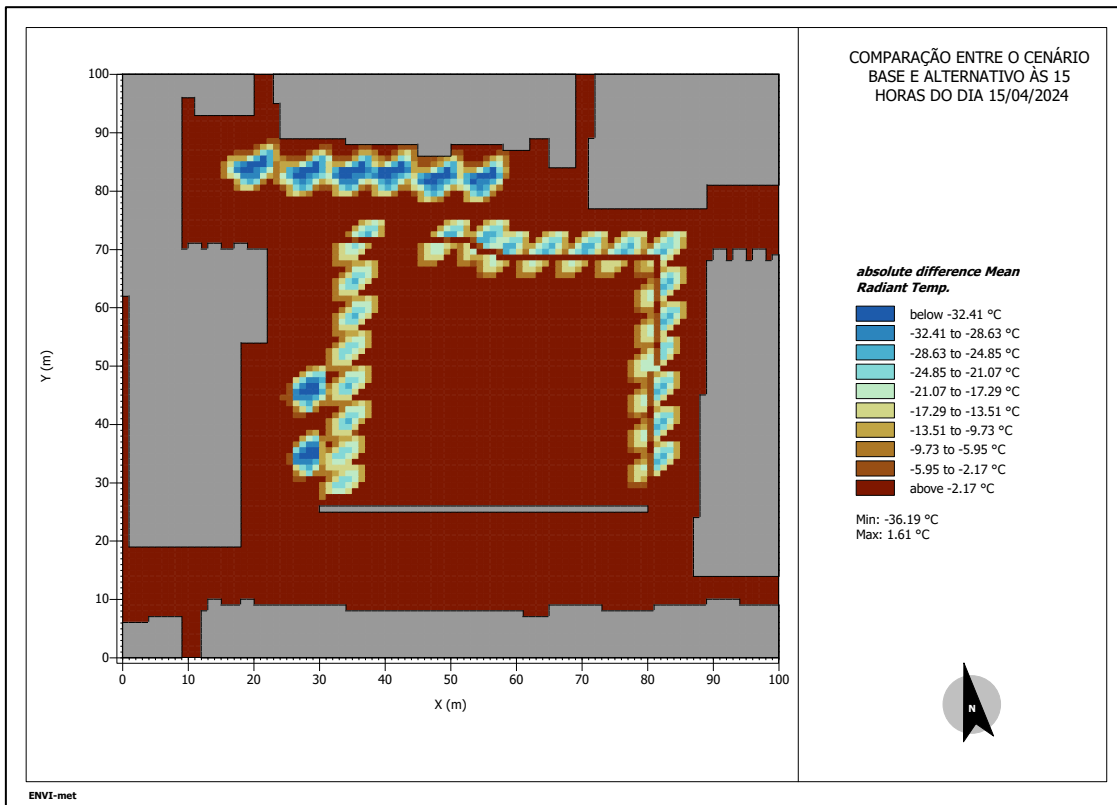


Figura 4.29 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 15 horas do dia 15 de abril de 2024.

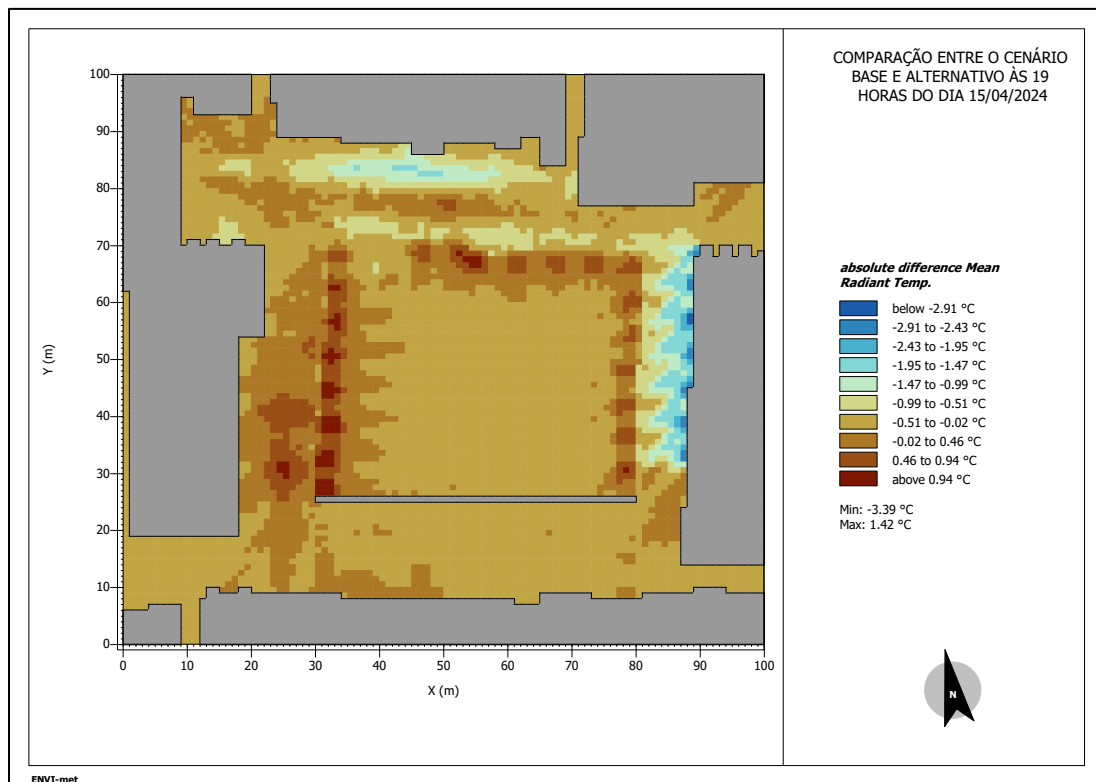


Figura 4.30 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 19 horas do dia 15 de abril de 2024.

Continuando com o padrão usado para analisar a Ta, no ultimo dia, foram utilizados os horários das 10 horas, 16 horas e 20 horas. As figuras abaixo ilustram os mapas e o comportamento da Tmr.

O terceiro dia, como foi visto anteriormente, foram simuladas as maiores Ta, e como consequência os mapas também mostraram que foram obtidas as maiores diferenças de Tmr. Isso induz que o CA tem um impacto mais visível em condições de maior calor, gerando uma maior diferença na Tmr devido às novas sombras criadas pela vegetação. Durante às 10:00 horas, as diferenças variaram de 1,92°C à -40,23°C (Figura 4.31).

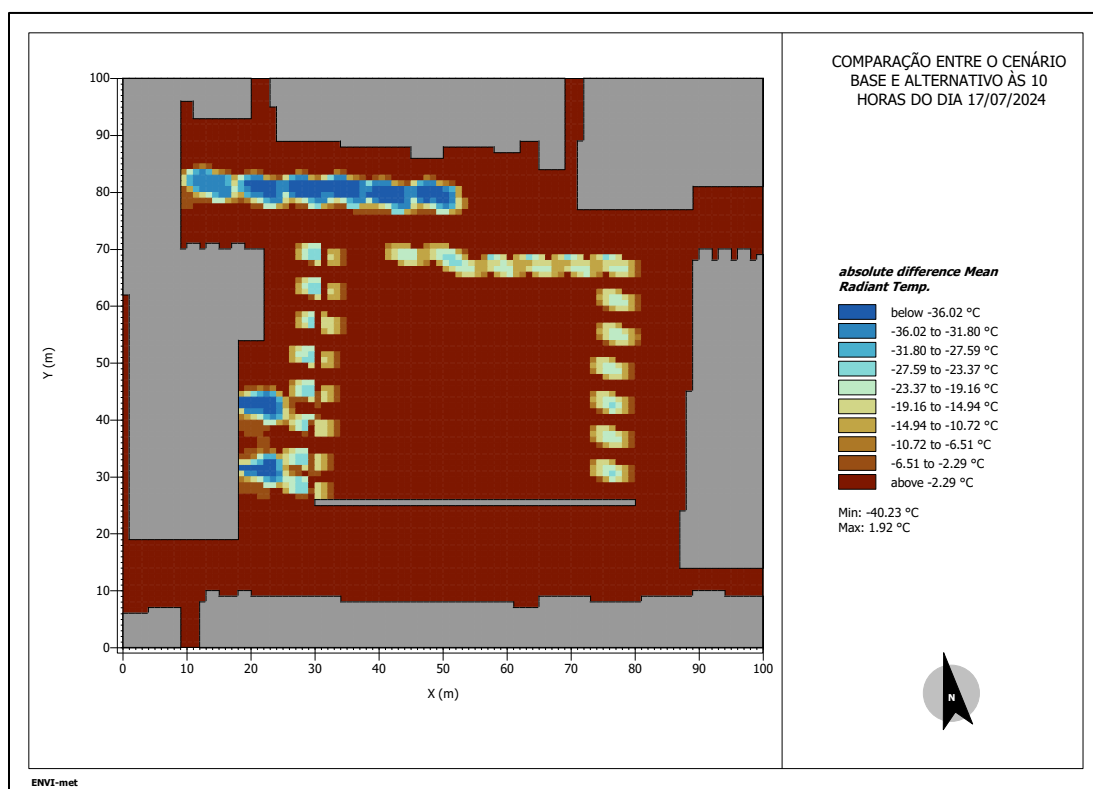


Figura 4.31 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 10 horas do dia 17 de julho de 2024.

Às 16 horas (Figura 4.32), a variação da Tmr é de 2,00°C à -39,9°C. Já às 20 horas (Figura 4.33), as diferenças de temperatura variam de 1,29° À -3,20°C, assim, registrando as menores diferenças do dia. Aqui é encontrado o mesmo comportamento dos dias anteriores, e as maiores diferenças são encontradas nos mesmos lugares, apenas com valores diferentes.

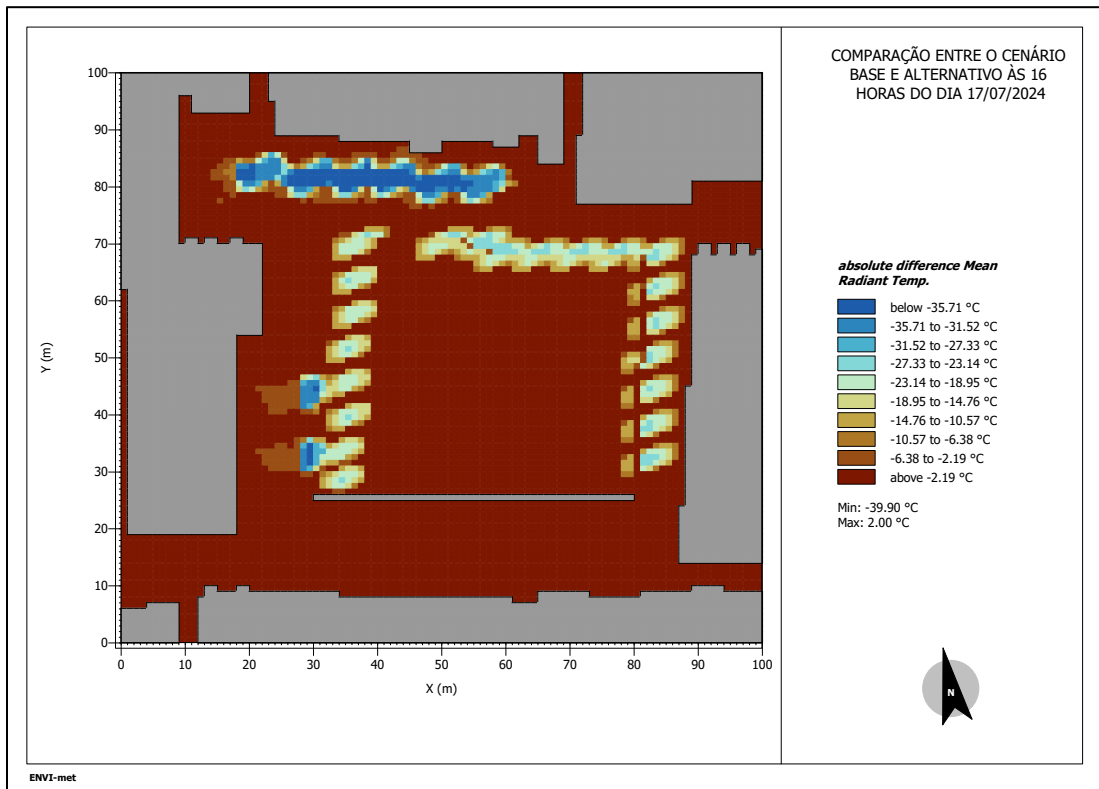


Figura 4.32 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 16 horas do dia 17 de julho de 2024.

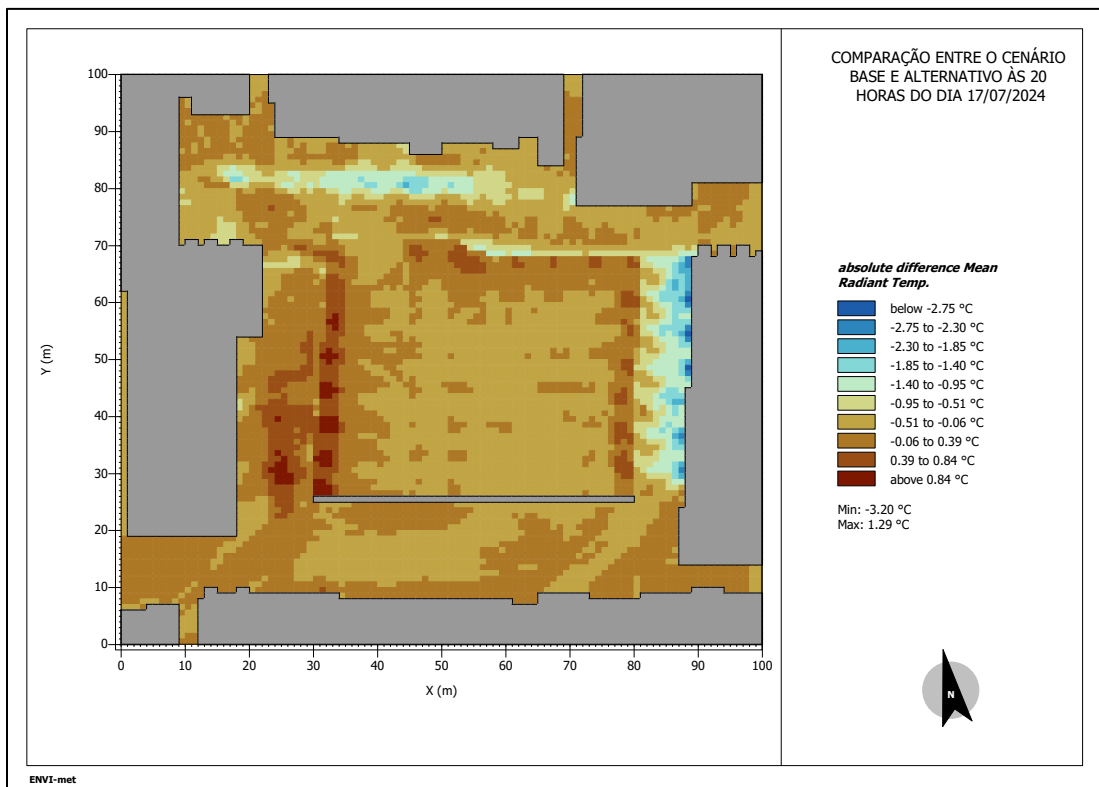


Figura 4.33 - Comparação das simulações de Temperatura Média Radiante entre os cenários, às 20 horas do dia 17 de julho de 2024.

Assim, ao analisar a Tmr, os mapas demonstram um comportamento semelhante nos três dias avaliados, com padrões consistentes de variação da incidência solar ao longo dos diferentes períodos. Foram observadas diferenças em todos os horários, indicando o impacto da nova vegetação, principalmente pela projeção de sombras sobre os pavimentos. Nesses locais, a simulação determina que a radiação solar seria parcialmente absorvida pelas folhas, reduzindo a reflexão para outras superfícies. Assim, além de receber radiação direta, a vegetação também interceptou a radiação refletida das superfícies horizontais e verticais ao redor. Em seu estudo realizado em Valladolid (Espanha), Alves *et al.* (2022), mostra os mesmos parâmetros que foram citados acima, e também apresenta resultados com reduções na Temperatura média Radiante que chegam até 22,11°C.

As maiores variações de Tmr entre os cenários, no período da tarde, foram registradas no terceiro dia, que também apresentou Ta mais altas em comparação aos dias anteriores. Isso indica que o CA teve um maior impacto em condições de maior calor, gerando uma maior diferença na Tmr devido às novas sombras criadas pela vegetação.

4.5.3 Cálculo do PMV (Predicted Mean Vote – Voto Médio Estimado)

Para uma análise mais detalhada do índice de conforto térmico para os horários em que foram realizadas as comparações de cenário, foi calculado o predicted mean vote (PMV). Segundo Oliveira (2008), o seu cálculo pode ser realizado através das variáveis de entrada que são: Temperatura do ar (Ta), Temperatura Média Radiante (Tmr), Humidade relativa (HR), Velocidade do ar (Va), dados estimados pelas simulações, aos que se juntam dados de nível de Atividade física (met) e Nível de isolamento do vestuário (clo), obtidos através de inquéritos realizados nesse estudo.

Levando em consideração os dados coletados de local e horário, foi possível estabelecer uma relação com os horários específicos em que as comparações do cenário foram realizadas em cada dia. Com base nessa relação, foram realizados os cálculos utilizando uma calculadora virtual. A Tabela 23 mostram os dados de entrada, e os resultados obtidos estão disponíveis na Tabela 24.

Tabela 23 – Dados usados para a realização do cálculo do predicted mean vote (PMV).

	Dados reais coletados			Cenário base			Cenário alternativo			
	Ponto	A	C	D	A	C	D	A	C	D
		09:00	15:00	18:00	09:00	15:00	18:00	09:00	15:00	18:00
Dia 1	clo	0,53	0,42	0,39	0,53	0,42	0,39	0,53	0,42	0,39
	met	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Ta	20	28,4	26,2	18,1	26,7	24,2	17,7	25,9	23,4
	Tmr	52,5	47,4	25,7	52,5	40	25,7	24,2	38,9	24,6
	Va	0,7	1	0,3	0,7	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3
	HR	34,2	23,9	36,4	57	30,8	38,9	57,7	31,3	39,7
	Ponto	A	D	D	A	D	D	A	D	D
		09:00	15:00	19:00	09:00	15:00	19:00	09:00	15:00	19:00
Dia 2	clo	0,42	0,42	0,77	0,42	0,42	0,77	0,42	0,42	0,77
	met	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Ta	15,5	28	25,8	16,1	26,5	24,9	16	26,1	24,7
	Tmr	31	79,7	56,2	55	70,3	22,9	55	48,8	22,5
	Va	1,2	2	0,8	1,8	0,4	0,3	1,7	0,4	0,4
	HR	54,6	10,9	40,4	68,2	27,7	30,6	68,4	28,5	31
		D	D	B	D	D	B	D	D	B
		10:00	16:00	20:00	10:00	16:00	20:00	10:00	16:00	20:00
Dia 3	clo	0,42	0,45	0,42	0,42	0,45	0,42	0,42	0,45	0,42
	met	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Ta	21,8	32,7	31,4	25,1	33,7	29,1	24,4	32,9	29
	Tmr	44,7	74,6	38,9	66	74,5	24,3	28,5	36,7	24,1
	Va	0,8	1,2	0,9	0,5	0,4	1	0,5	0,4	1
	HR	40,6	13,6	30,6	46,9	23,1	28,7	49,3	24,4	28,8

Tabela 24 – Resultados após a realização dos cálculos para o predicted mean vote (PMV).

Predicted mean vote (PMV)				
	Ponto	Dados reais coletados	Cenário base	Cenário alternativo
Dia 1	A	09:00	1,4	1,1
	C	15:00	2,4	1,7
	D	18:00	0,2	-0,3
Dia 2	A	09:00	-2,7	-0,8
	D	15:00	3	3
	D	19:00	3	0,4
Dia 3	D	10:00	0,7	3
	D	16:00	3	3
	B	20:00	2,4	0,4

A escala do PMV varia de -3 a +3, conforme mostrado na Tabela 3. A análise dos resultados, apresentada na Tabela 24, mostra que os valores dos Dados reais medidos foram próximos ou até iguais aos do cenário base. Ao comparar esses dados com os resultados do cenário alternativo, foi possível observar diferenças nos níveis de conforto térmico, que, na maioria das vezes, tendem para a neutralidade, representada pelo valor 0 (Tabela 3). Uma situação considerável ocorreu no terceiro dia, no ponto D, às 10:00 horas. Nesse momento, o nível de conforto térmico no CB era avaliado como "muito quente" (+3), e no CA foi ajustado para 0,1, indicando um conforto térmico neutro (0).

Vale destacar que os pontos C e D estão localizados próximos da vegetação proposta para a praça, enquanto os pontos A e B estão em uma região central, com menor influência da nova arborização. Segundo Costa (2022), valores de PMV que indicam conforto térmico, situados entre -1 e +1, são encontrados próximos à vegetação arbórea, devido ao efeito de sombra. Já os maiores valores de PMV, que indicam maior sensação de calor, aparecem em áreas com pavimentação asfáltica. Isso sugere que as zonas sombreadas proporcionam maior conforto térmico. De modo geral, a maioria dos pontos onde foi realizado o cálculo apresenta variações positivas, aproximando as condições à neutralidade térmica (valor 0).

5 CONCLUSÃO

Entender o contexto microclimático de determinadas áreas é essencial para proporcionar melhorias por meio dos estudos e pesquisas relacionados ao conforto térmico, utilizando modelos matemáticos. A partir dos dados climáticos que foram coletados, foi possível identificar que a praça apresenta altas Temperaturas do ar e Temperaturas média radiante, principalmente durante o verão, onde os valores mais extremos estão concentrados próximos aos edifícios.

Através da aplicação dos questionários foi possível identificar um padrão de comportamento entre algumas variáveis, especialmente entre Temperatura do ar e a Sensação Térmica, entre Humidade relativa e a Sensação térmica, e entre a Circulação do ar e a Percepção de temperatura.

Os resultados permitem identificar que as curvas de Temperatura do ar dos dados coletados (medidos) nas estações microclimáticas são semelhantes às curvas dos dados do cenário base que foram simulados pelo software ENVI-met. Além disso, a matriz de correlação de Pearson indica a existência de correlações, sendo relação forte a muito forte e direta, permitindo uma validação parcial do modelo desenvolvido.

O comportamento para os três dias foi semelhante, apresentando proximidade entre as curvas de Temperatura do ar, no entanto, os dados simulados no primeiro e último dia foram os que mais chegaram perto dos dados medidos.

As comparações entre os dois cenários, base e alternativo, por meio dos mapas plotados no ENVI-met, indicam que as Soluções Baseadas na Natureza propostas alteraram os padrões microclimáticos da praça, trazendo um benefício na redução da Temperatura do ar e, de modo mais expressivo, da Temperatura Média Radiante, embora de modo mais localizado na envolvente da vegetação adicionada para a simulação. Com base nos cálculos do PMV, foi possível identificar que as mudanças feitas na praça aproximaram as condições locais do conforto térmico considerado ideal.

Desta forma, apesar das dificuldades encontradas na definição de uma proposta de intervenção na Praça Camões, principalmente devido às condições do terreno, que dificultam a inserção de diferentes espécies de vegetação e unidades de plantas, as SBNs que foram propostas apresentaram resultados potencialmente positivos. O cenário alternativo demonstrou um benefício de redução das temperaturas no local que chegou a $-2,29^{\circ}\text{C}$ para TA e $-46,55^{\circ}\text{C}$ para Tmr, assim, sugerindo uma contribuição para a melhoria do conforto térmico, saúde e qualidade de vida das pessoas que frequentam o espaço.

O ENVI-met apresenta limitações em sua funcionalidade de modelagem, não permitindo a modelação de tendas térmicas ou pergolados. Embora essas soluções tenham sido consideradas, elas foram descartadas devido a essa restrição técnica. No entanto, tais abordagens poderiam ser altamente relevantes para estudos futuros, caso o software seja aprimorado para incluir essas funcionalidades.

Com isso, para estudos futuros, é aconselhável considerar de forma mais ampla as intervenções no local analisado. Essas intervenções podem variar desde alterações em superfícies de baixo albedo até a implementação de elementos que elevem a quantidade de sombra, como árvores e estruturas de sombra, ou seja, alterações naturais e não naturais. Estas estratégias podem potencializar a diminuição da T_a e da T_{mr} , favorecendo para um microclima mais agradável entre os cenários analisados.

Estudos dessa natureza, quando ampliados para mais áreas e aplicados por autoridades públicas, podem contribuir de maneira relevante para a melhoria da paisagem urbana, do clima e do conforto térmico local. Esses avanços auxiliam na mitigação das alterações climáticas e promovem a saúde e o bem-estar da população e, também, se alinham aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela ONU para serem alcançados até 2030.

BIBLIOGRAFIA

Abdel-Aziz, D. M., Shboul, A. A., & Al-Kurdi, N. Y. (2015). Effects of tree shading on building's energy consumption-the case of residential buildings in a mediterranean climate. *American Journal of Environmental Engineering*, 5(5), 131-140.

Abreu, L. V. D. (2008). Avaliação da escala de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas. *Campinas, SP*, 154.

Akbari, H., & Davis, S. (1992). *Cooling our communities*. A guidebook on tree planting and light-colored surfacing (Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. LBL-31587:217). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Chance Division.

Alves, F. M. (2020). *Modelação microclimático no contexto urbano-industrial: um caso da Zona Industrial das Cantarias (Bragança) – Portugal*. (Dissertação de mestrado, Instituto Politécnico de Bragança). Bragança: [s.n].

Alves, F. M., Gonçalves, A., & del Caz-Enjuto, M. R. (2022). O uso do Envi-Met para a avaliação dos benefícios potenciais de soluções baseadas na natureza em parques industriais: Um estudo de caso do Parque Industrial de Argales (Valladolid, Espanha). *Infraestruturas*, 7(6), 85.

Ambrosini, D., Galli, G., Mancini, B., Nardi, I., & Sfarra, S. (2014). Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-Met® climate model. *Sustainability*, 6(10), 7013-7029.

Andrade, H. (2005). O clima urbano: Natureza, escalas de análise e aplicabilidade. *Finisterra*, 40(80).

Andrade, H. J. N. (2003). Bioclima humano e temperatura do ar em Lisboa. *Universidade de Lisboa: Lisbon, Portugal*.

Ali-Toudert, F., Djenane, M., Bensalem, R., & Mayer, H. (2005). Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. *Climate Research*, 28(3), 243-256.

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.

Assis, E. S. (2006). Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade de Belo Horizonte. *Revista de Urbanismo e Arquitetura*, 21–25.

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(1), 1-26.

Baltazar, S. (2014). Novos mapas bioclimáticos de Lisboa: Modelação da temperatura fisiológica equivalente. *Finisterra - Revista Portuguesa de Geografia*, 98, 81–94.

Barbirato, G. M., Souza, L. C. L., & Torres, S. C. (2007). *Clima e cidade: A abordagem climática como subsídio para estudos urbanos*. Edufal.

Bento, A. C. (2018). Diferentes índices para estimação do conforto térmico em Sorocaba-SP.

Brandão, A. M. P. M. (2003). O clima urbano na cidade do Rio de Janeiro. In C. A. F. Monteiro & F. Mendonça (Eds.), *Clima urbano* (1ª ed., 192 p.). Editora Contexto.

Brandão, R. S. (2009). *As interações espaciais urbanas e o clima: incorporação de análises térmicas e energéticas no planejamento urbano* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Bragança, C. M. de. (2008). *Plano de urbanização de Bragança*.

Bruse, M. (2004). ENVI-met 3.0: updated model overview. *University of Bochum*. Retrieved from: www.Envi-met.Com, 3.

Carfan, A. C. (2011). *Análise de conforto térmico em áreas abertas no município de Ourinhos - SP* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). Repositório de Teses e Dissertações da USP.

Callegari-Jacques, S. M. (2009). *Bioestatística: Princípios e aplicações*. Artmed Editora.

Catelo Branco, L. M. B. (2009). *Microclimas urbanos no plano piloto de Brasília: O caso da Superquadra 108 Sul*.

Coelho, D. A. S. (2014). *Avaliação do conforto térmico em salas de aula*.

Costa, M. J. G. (2020). *Simulação microclimática com ENVI-met para o Bairro Santa Isabel em Bragança*. (Dissertação de mestrado, Instituto Politécnico de Bragança). Bragança: [s.n].

Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2015). *Desenvolvimento de microclima em espaços urbanos abertos: A influência da forma e dos materiais*. *Energy and Buildings*, 108, 156-174.

Duarte, D. H. S., Shinzato, P., Gusson, C. S., & Alves, C. A. (2015). The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, 14(2), 224-239.

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

European Commission - EC. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: Final report of the Horizon 2020 expert group on nature-based solutions and re-naturing cities*.

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. S. R. S. (2009). *Manual de conforto térmico* (7ª ed.). São Paulo: [s.n.].

- Fariña Tojo, J., Huerta, M., & Hernández, A. (2013). *Manual de desenho bioclimático urbano*.
- Gangui, A., Lastra, C., & Karaseur, F. (2018). On Times and Shadows: The Observational Analemma. *The Physics Teacher*.
- Gonçalves, A., Ribeiro, A., Maia, F., & Feliciano, M. (2014). *Clima Urbano de Bragança*.
- Gouveia, H. (2017). A importância dos climas de referência na simulação.
- Gonçalves, A., Ribeiro, A., Maia, F., & Feliciano, M. (2018). Urban cold and heat island in the city of Bragança (Portugal). *Climate*, 6(3), 1–14.
- IPMA. (2023). *Monitorização do clima*. Instituto Português Do Mar e Da Atmosfera.
- Johansson, E. D. O. (2009). *Climate conscious architecture and urban design in Jordan towards energy efficient buildings*. Swedish International Development Cooperation Agency (Sida).
- Johansson, E., & Emmanuel, R. (2006). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. *International journal of biometeorology*, 51, 119-133.
- Kobiyama, M., & Manfroi, O. J. (1999). Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas. Curso de Extensão: *O Manejo de Bacias Hidrográficas sob a Perspectiva Florestal - UFPR*.
- Kuttler, W. (1988). Spatial and temporal structures of the urban climate – A survey. In K. Grefen & J. Lobel (Eds.), *Environmental Meteorology* (pp. 305-344). Kluwer Academic Publishers.
- Köppen, W. (1936). *Das geographische System de Klimate. Handbuch der Klimatologie*.
- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate* (Vol. 53). New York.

- Langer, I., Sodoudi, S., & Cubasch, U. (2012). Using the ENVI-MET program to simulate the microclimate in new town Hashtgerd. *The International Conference on ...*, September 2014, 61–64.
- Li, H., Harvey, J., & Kendall, A. (2013). Medição de campo do albedo para diferentes materiais de cobertura do solo e efeitos no desempenho térmico. *Building and Environment*, 59, 536-546.
- Mascaró, L. (1996). *Urbanenvironment*. Porto Alegre: Sagra DC Luzzatto.
- Maggiotto, G., Buccolieri, R., Santo, M., Leo, L., & Sabatino, S. (2014). Validation of temperature-perturbation and CFD-based modelling for the prediction of the thermal urban environment: The Lecce (IT) case study. *Environmental Modelling & Software*, 60, 69–83.
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51(4), 323–334.
- Monteiro, C. A. de F. (1976). *Teoria e clima urbano* (n. 25). Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Mills, G. M., & Arnfield, A. J. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon—II. Comparison of model results with measurements. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 27(2), 171-181.
- Nascimento, D. T. F., & Oliveira, I. J. de. (2011). Análise da evolução do fenômeno de ilhas de calor no município de Goiânia/GO (1986-2010). *Boletim Goiano de Geografia*, 31(2).
- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the human parameter. *Solar Energy*, 70(3), 227–235.
- Nikolopoulou, M., & Lykoudis, S. (2007). Use of outdoor spaces and microclimate in a Mediterranean urban area. *Building and Environment*, 42(10), 3691–3707.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. London: Routledge.

- Oke, T. R. (2004). *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites* (No. 81). World Meteorological Organization.
- Oliveira, A. R. C. S. (2008). *Avaliação da incerteza na determinação dos índices de conforto térmico PMV e PPD* (Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra). Coimbra: [s.n].
- Olgyay, V. (1963). *Design with climate*. Princeton: Princeton University Press.
- Orlansky, I. (1975). Rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56, 527–530.
- Orhan, O., Ekercin, S., & Dadaser-Celik, F. (2014). Use of Landsat land surface temperature and vegetation indices for monitoring drought in the Salt Lake Basin area, Turkey. *The Scientific World Journal*, 1–11.
- Ribeiro, A. G. (1993). As escalas do clima. *Boletim de Geografia Teórica*, 23(45–46), 288–294.
- Ribeiro, H., Pesquero, C. R., & de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M. (2016). Clima urbano e saúde: Uma revisão sistematizada da literatura recente. *Estudos Avançados*, 30(86), 67–82.
- Romero, M. A. B. (2001). *A arquitetura bioclimática do espaço público*. Brasília: Ed. UNB.
- Romano, F., & Back, N. (2001). A importância da modelagem do processo de projeto para o desenvolvimento integrado de edificações.
- Rosseti, K. A. C. (2013). *Efeitos do uso de telhados vegetados em ilhas de ENVI-Met* (Tese de mestrado). Universidade Federal do Mato Grosso.
- Ryu, Y., Bou-Zeid, E., Wang, Z., & Smith, J. (2016). Realistic Representation of Trees in an Urban Canopy Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 159, 193-220.
- Santos, B. F. (2016). *Urbanização e clima urbano do bairro Atalaia na cidade de Aracaju/SE* (Dissertação de mestrado). São Cristóvão.

Sorre, M. (2006). Objeto e método da climatologia. *Revista do Departamento de Geografia*, 18, 89.

Silva, B., Silva, C. F., & Santo, T. (2018). Protocolo de simulação computacional do microclima urbano para a cidade de Lisboa, Portugal. *In Colóquio Ibérico de Geografia*, 16, Lisboa.

Simon, H., Sinsel, T., & Bruse, M. (2020). Introduction of fractal-based tree digitalization and accurate in-canopy radiation transfer modelling to the microclimate model ENVI-met. *Forests*, 11(8), 869.

Simon, H., Lindén, J., Hoffmann, D., Braun, P., Bruse, M., & Esper, J. (2018). Modelagem da transpiração e temperatura foliar de árvores urbanas – Um estudo de caso avaliando o modelo de microclima ENVI-met em relação a dados de medição. *Landscape and Urban Planning*.

Stöberl, A. P. M., Diaz, L. T., Gadda, T. M. C., & Trajetória, L. D. V. (2019). Trajetória do conceito soluções baseadas na natureza e a relação com o Brasil: Uma análise bibliográfica.

Tooke, T., Coops, N., Voogt, J., & Meitner, M. (2011). Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. *Landscape and Urban Planning*, 102, 73-81.

Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., & Theodosiou, T. (2018). Analisando o desempenho do modelo de microclima ENVI-met e avaliando materiais frios e aplicações de vegetação urbana – Uma revisão. *Sustainable Cities and Society*.

Wannar, H., & Filliger, P. (1989). Orographic influence on urban climate. *Weather and Climate*, 9, 22–28.


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.

Yang, X., et al. (2013). Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. *Building and Environment*, 60, 93–104.

Zakšek, K., Oštir, K., & Kokalj, Ž. (2011). Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote. Sens.*, 3, 398-415.

ANEXO

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



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior Agrária

Conforto Térmico na Praça de Camões em Bragança (Portugal)

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)	

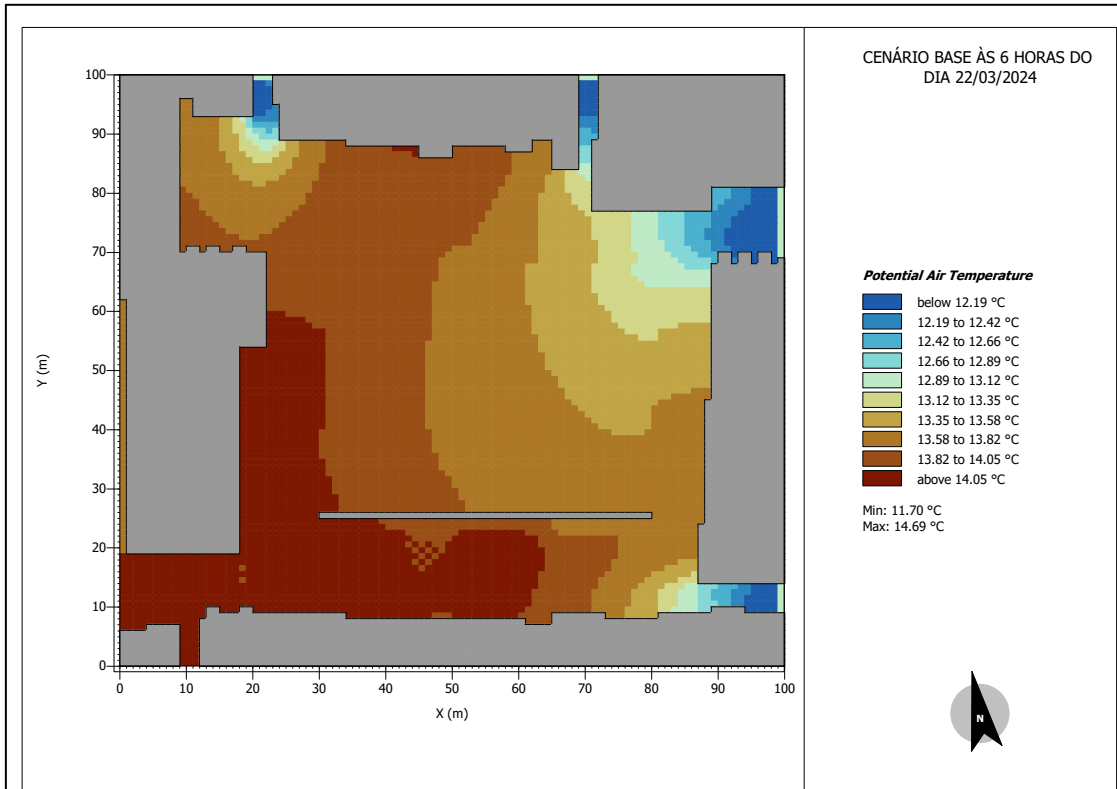
2.6 Que temperatura pensa estar agora? _____

2.7 Como está vestido? (Preencha com X).

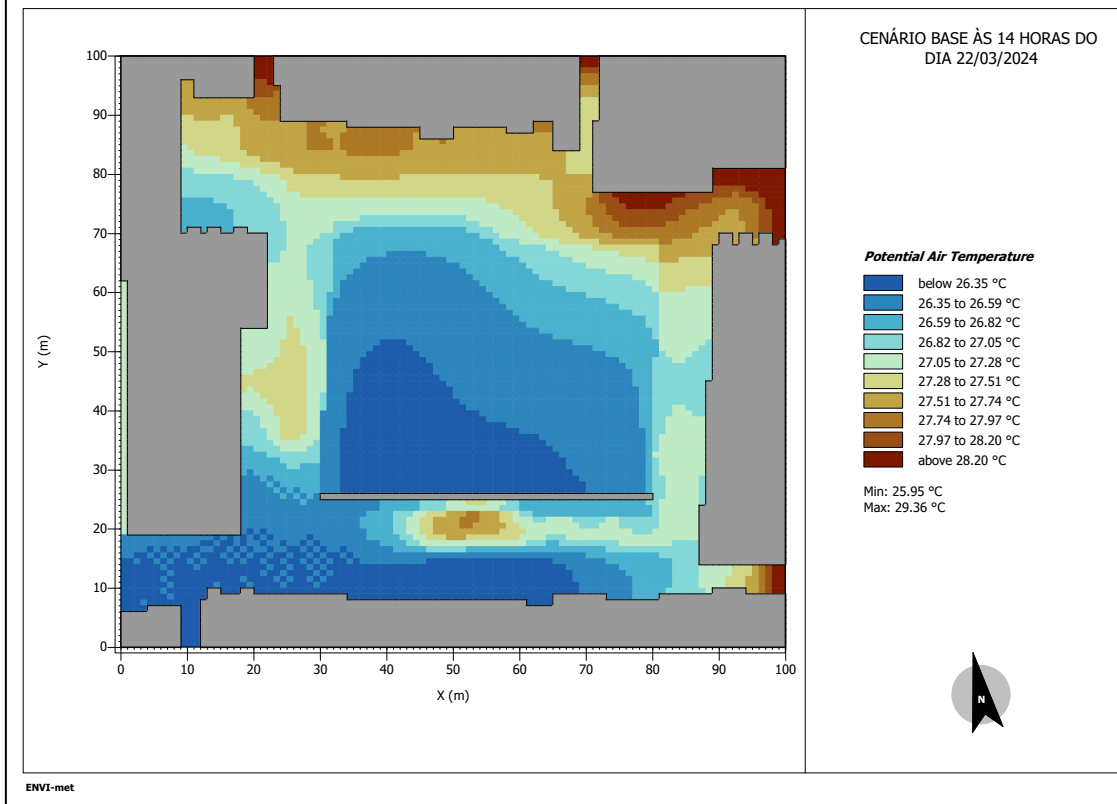
<input type="checkbox"/> Camisola de manga comprida	<input type="checkbox"/> Calças de treino	<input type="checkbox"/> Sapato com sola grossa
<input type="checkbox"/> Camisola de manga curta (T-shirt)	<input type="checkbox"/> Calções	<input type="checkbox"/> Botas
<input type="checkbox"/> Camisa de manga comprida	<input type="checkbox"/> Saia curta	<input type="checkbox"/> Sandálias abertas
<input type="checkbox"/> Camisa de manga curta	<input type="checkbox"/> Saia longa	<input type="checkbox"/> Sandálias fechadas
<input type="checkbox"/> Casaco	<input type="checkbox"/> Vestido curto	<input type="checkbox"/> Chinelos
<input type="checkbox"/> Máscara	<input type="checkbox"/> Vestido longo	Outros: _____
<input type="checkbox"/> Calças de ganga	<input type="checkbox"/> Sapato com sola fina	

Obrigado pela sua contribuição!

ANEXO B: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário base no primeiro dia.

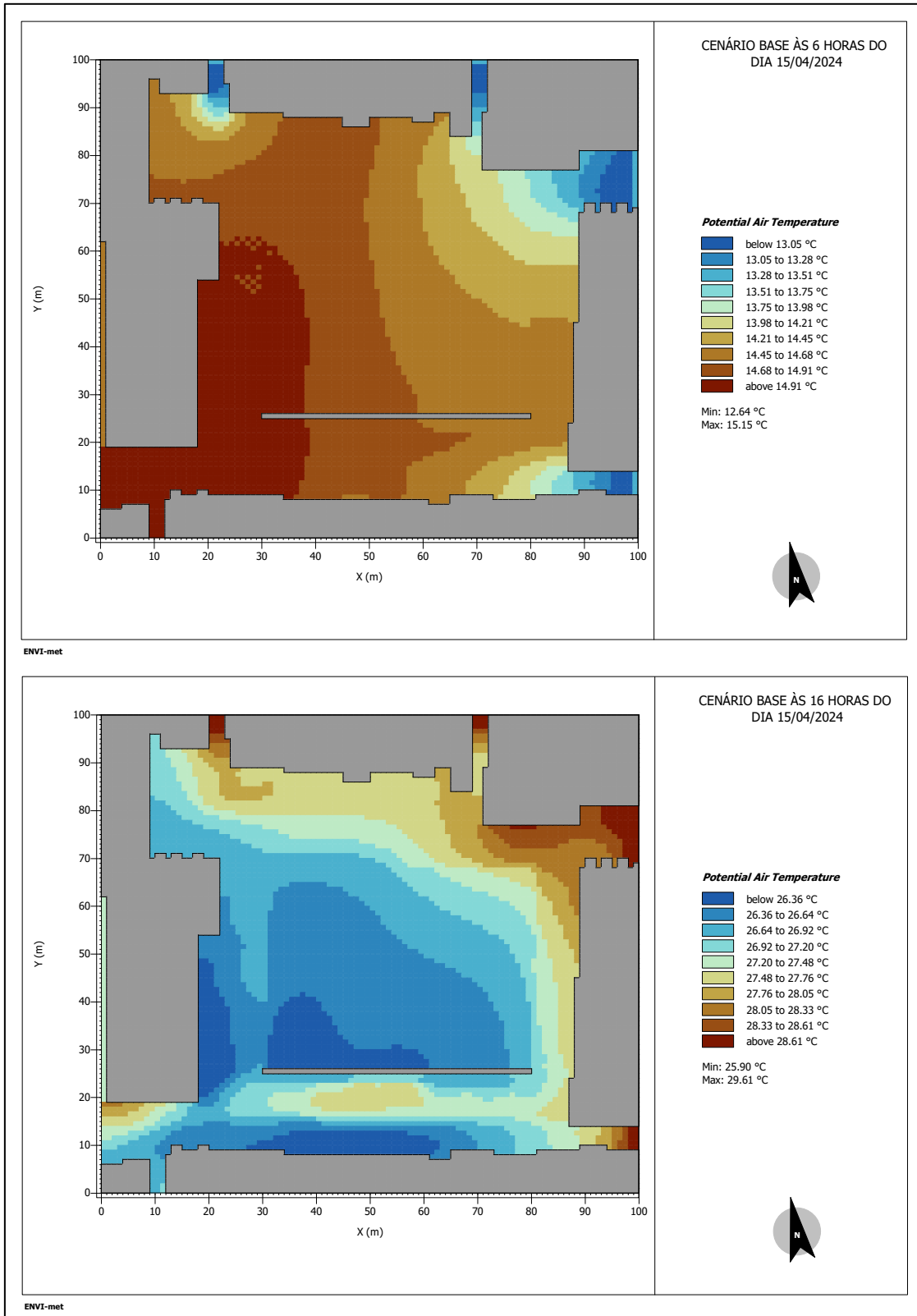


ENVI-met

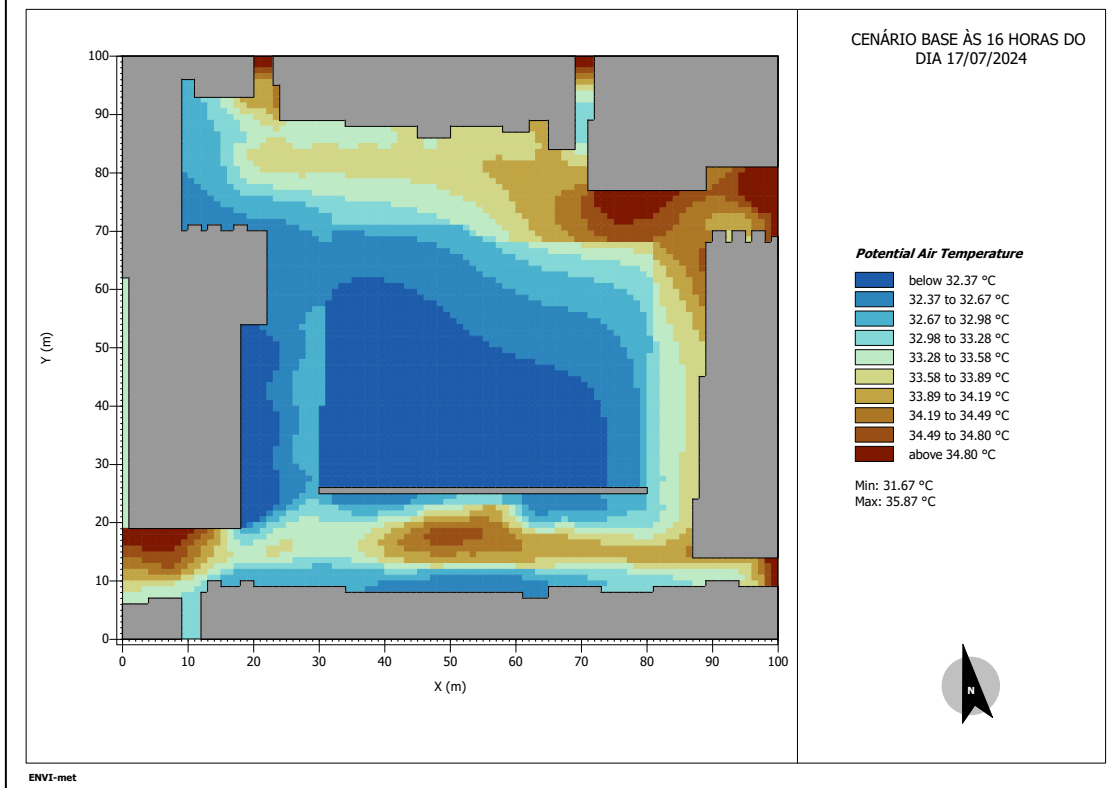
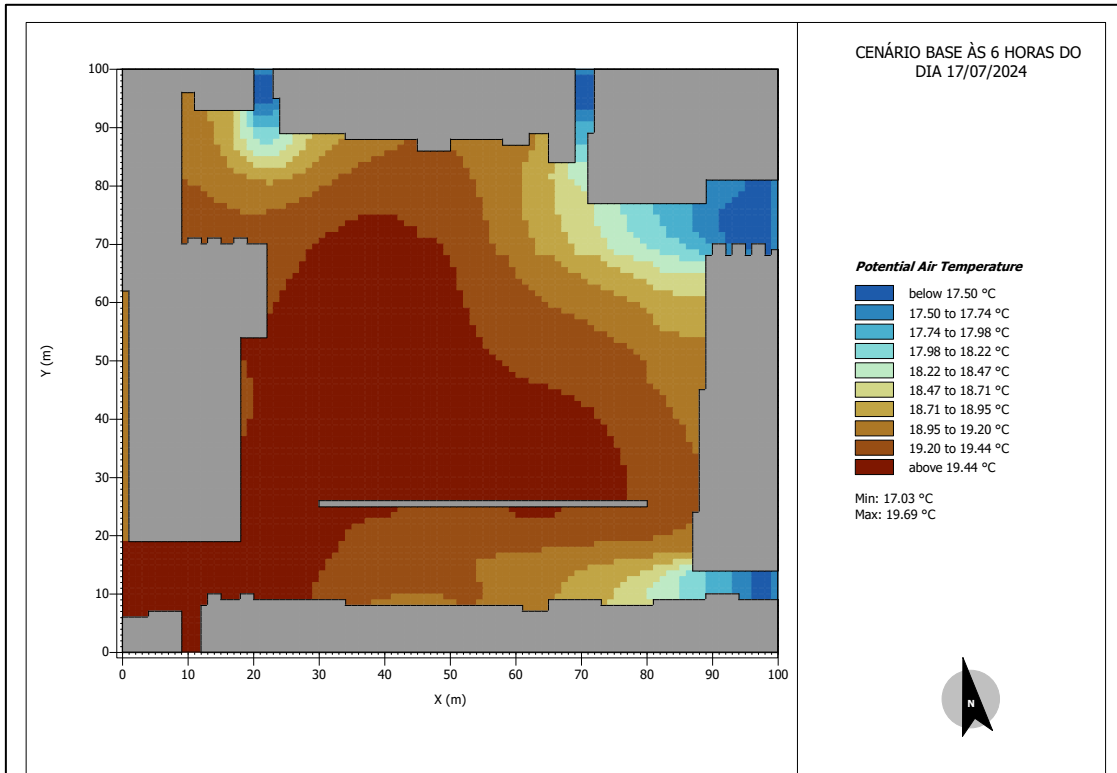


ENVI-met

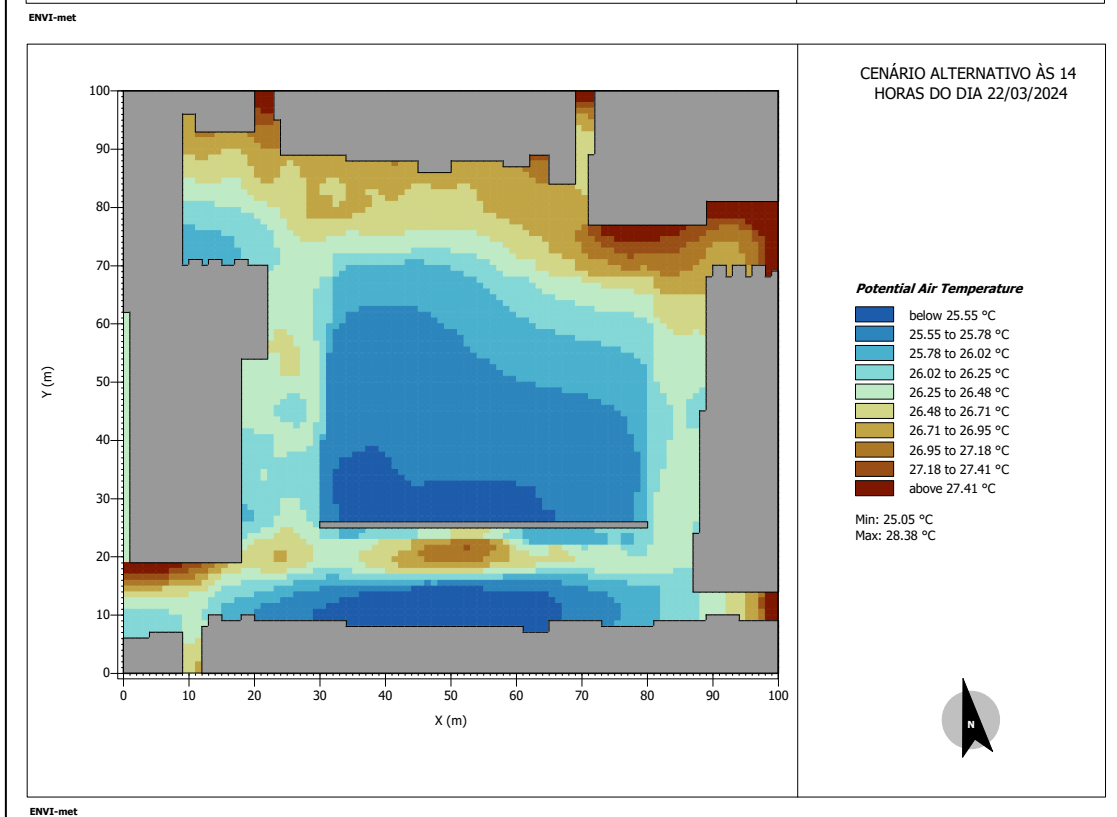
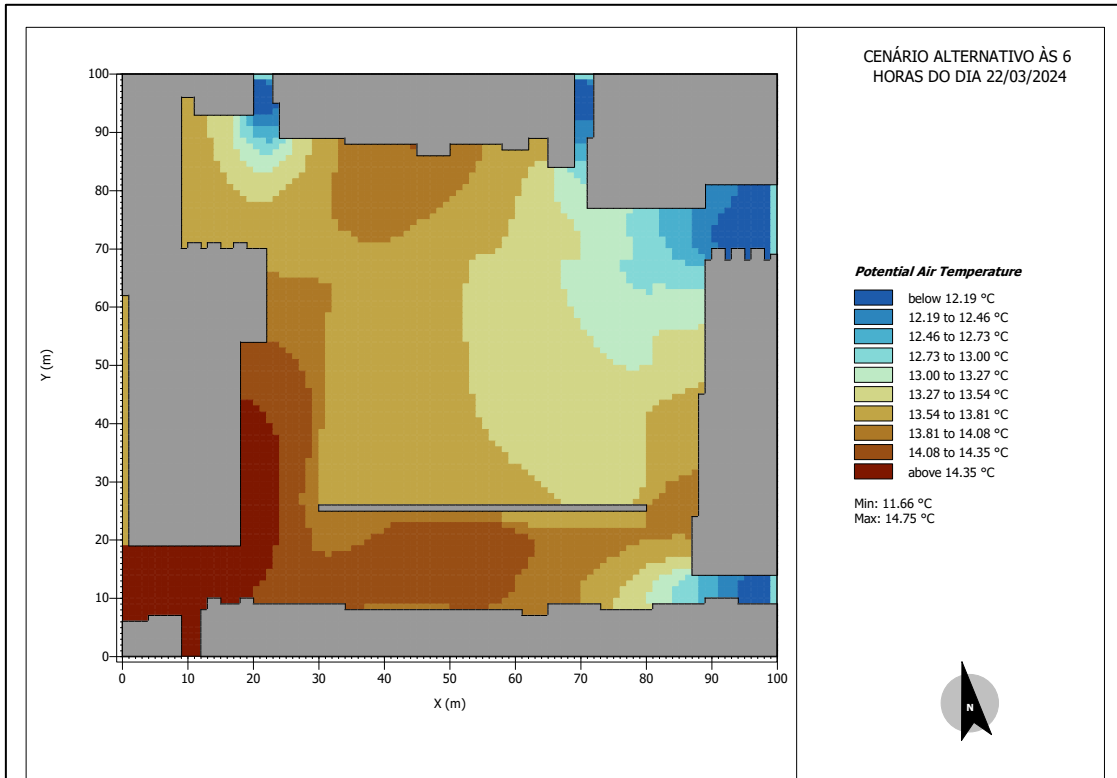
ANEXO C: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário base no segundo dia.



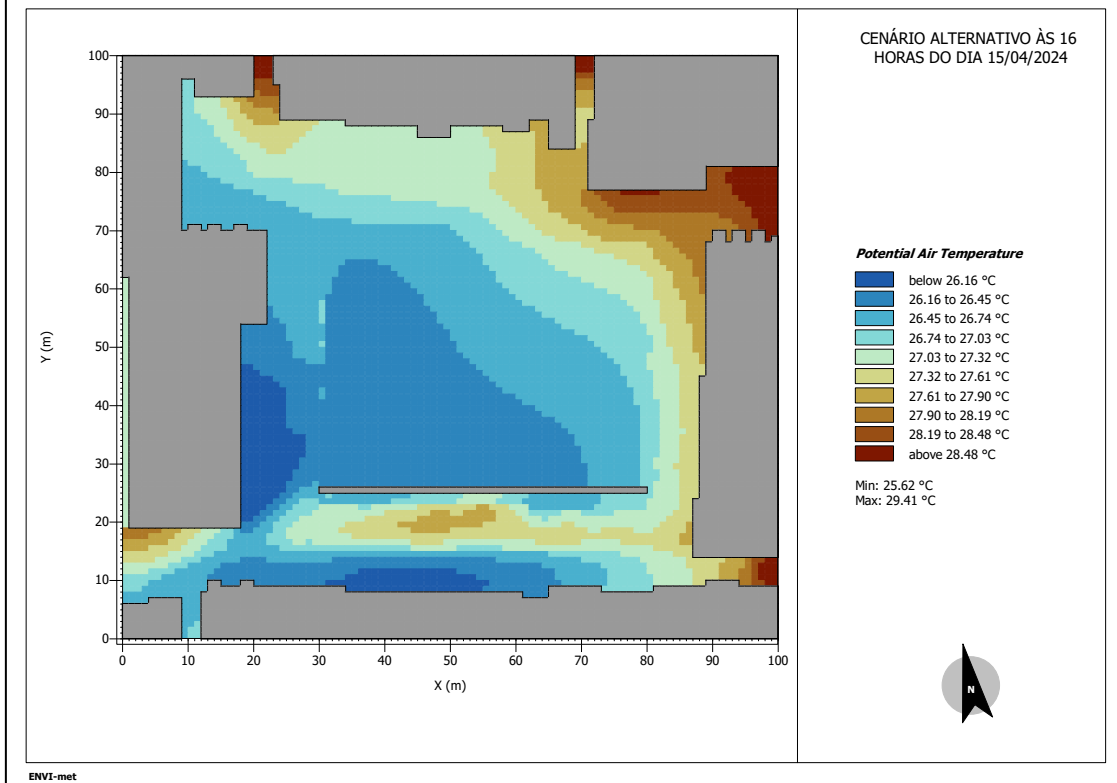
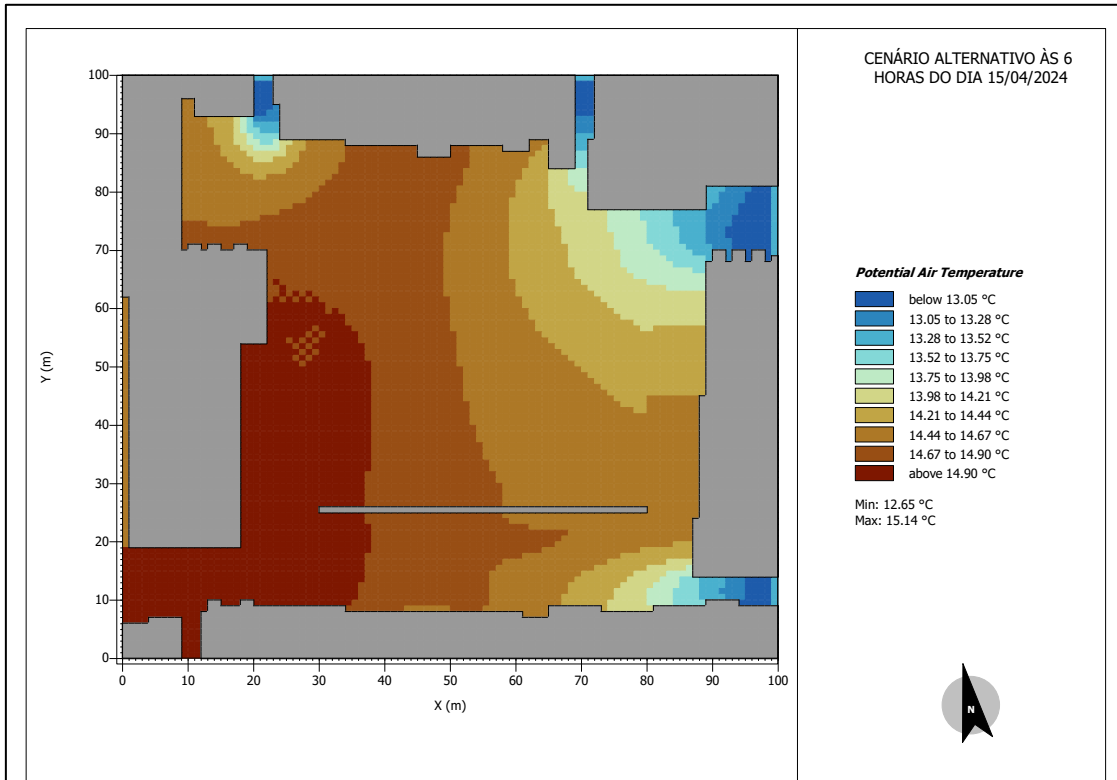
ANEXO D: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário base no terceiro dia.



ANEXO E: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo no primeiro dia.



ANEXO F: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo no segundo dia.



ANEXO G: Mapa de resultados após a simulação no ENVI-met para o cenário alternativo no terceiro dia.

