



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Tiago Michelin

**Análise por simulação computacional da influência de elementos vegetados e de  
sombreamento no conforto térmico ao nível do pedestre em microclima urbano para  
Florianópolis - SC**

Florianópolis  
2021

Tiago Michelin

**Análise por simulação computacional da influência de elementos vegetados e de  
sombreamento no conforto térmico ao nível do pedestre em microclima urbano para  
Florianópolis - SC**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em  
Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.

Coorientador: Prof. Caio Frederico e Silva, Dr.

Florianópolis

2021

## Ficha de identificação da obra

Michelson, Tiago

Análise por simulação computacional da influência de elementos vegetados e de sombreamento no conforto térmico ao nível do pedestre em microclima urbano para Florianópolis - SC / Tiago Michelson ; orientador, Martin Ordenes Mizgier, coorientador, Caio Frederico e Silva, 2021.  
145 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Sombreamento. 3. Vegetação urbana. 4. Conforto térmico externo. 5. Simulação computacional. I. Mizgier, Martin Ordenes . II. Silva, Caio Frederico e . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Tiago Michelin

Análise por simulação computacional de elementos de sombreamento e vegetados no conforto térmico ao nível de pedestre no microclima urbano em Florianópolis - SC

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

Prof.(a) Simone Queiroz da Silveira Hirashima, Dr.(a)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Prof.(a) María Andrea Triana Montes, Dr.(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Renato Tibiriçá de Saboya, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

---

Prof. Paolo Colosso. Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.  
Orientador

---

Prof. Caio Frederico e Silva, Dr.  
Coorientador

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado à minha família, principalmente aos meus queridos pais.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à Deus, grande arquiteto divino, por me proteger e guiar nesse percurso.

Agradeço ao professor Martin Ordenes Mizgier pela orientação, ensinamentos, suporte e apoio durante todo o período do mestrado.

Agradeço ao professor Caio Frederico e Silva pela coorientação, ajuda com o software e considerações importantes para a pesquisa.

Agradeço ao Programa de Bolsas Universitárias de Santa Catarina (Uniedu) pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores Simone Queiroz da Silveira Hirashima, María Andrea Triana Montes e Renato Tibiriçá de Saboya por aceitarem e participarem das bancas de qualificação e defesa, pelos comentários e apontamentos.

Agradeço aos amigos que os momentos de encontros do mestrado proporcionaram e que foram fundamentais em todo o processo com aprendizados e compartilhamento de vivências, em especial Fernando, Mariane, Mariana, Rafael, Roseana, Tamara e Vinicius.

Agradeço à Mônica Pasqualini Chaves, amiga que o mestrado me apresentou, colega de pesquisa que esteve ao meu lado em todos os momentos desde o primeiro dia dessa jornada. À amizade que se fortalece a cada dia dentro e fora do mestrado.

Agradeço à Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo da Universidad de la República, do Uruguai pelo empréstimo da licença do software ENVI-met, fundamental para o desenvolvimento da pesquisa.

E por último, e não menos importante, agradeço à minha irmã Fabiane, aos meus pais, Neocir e Luerci, pelo apoio e por tudo que proporcionaram para que eu pudesse estar onde estou hoje.

“O caráter é como a árvore, e a reputação como a sombra dela. A sombra é o que dela pensamos; a árvore, o que ela é realmente”

(Abraham Lincoln)

## RESUMO

Com o constante crescimento dos centros urbanos, em muitos casos, a vegetação é negligenciada e o aumento da temperatura das cidades é um problema cada vez mais comum para planejadores do espaço urbano, que devem pensar tanto na cidade como um todo, quanto em seu principal usuário, o pedestre. A pesquisa é desenvolvida a partir de simulações com o software ENVI-met, buscando entender os efeitos do sombreamento propiciado tanto pela vegetação quanto por elementos opacos ao nível do pedestre, avaliando a temperatura radiante média e o índice de conforto térmico PET (*Physiological Equivalent Temperature*). O estudo aplica-se em uma área urbana, com um fluxo intenso de pedestres, que se localiza na cidade de Florianópolis, com clima classificado como Cfa. A área possui proximidade com terminais de ônibus e se caracteriza por edificações públicas e comerciais. O espaço foi modelado digitalmente, gerando mais três variações do modelo original. A primeira variação é adicionada vegetação arbórea em todas as vias da área, a segunda variação, essa vegetação é substituída por um elemento opaco da mesma proporção e na última variação, toda a vegetação existente no modelo original é retirada. Foram analisados dois dias típicos, sendo um em janeiro, caracterizado por temperaturas mais altas, e o outro em julho, com temperaturas mais amenas, em três horários do dia, iniciando às nove horas da manhã, com intervalo de três horas cada. Todos os modelos são comparados entre si e os resultados mostraram que tanto o sombreamento proporcionado por árvores, quanto por elementos opacos apresentam-se como boas alternativas para a diminuição da  $T_{mrt}$  e melhores níveis de conforto avaliados pelo índice PET. O modelo com elementos de sombreamento opacos demonstrou um resultado positivo logo abaixo de sua projeção de inserção, enquanto a inserção de vegetação arbórea mostrou um resultado positivo menos intenso, porém mais abrangente. A supressão de toda a vegetação causou uma piora em relação ao modelo original. Os resultados apresentam a importância de simulações de cenários urbanos para gestores e planejadores e podem corroborar com a elaboração de políticas públicas com foco na mitigação dos efeitos do aquecimento urbano e preservação de espaços verdes urbanos.

**Palavras-chave:** Sombreamento. Vegetação urbana. Simulação computacional. Conforto térmico externo. Microclima urbano.

## ABSTRACT

With the constant growth of urban centers, in many cases, vegetation is neglected and the increase in temperature of cities is an increasingly common problem for urban space planners, who must think both about the city as a whole and its main focus. user, the pedestrian. The research is developed from simulations with the ENVI-met software, seeking to understand the effects of shading provided by both vegetation and opaque elements at the pedestrian level, evaluating the average radiant temperature and the PET (Physiological Equivalent Temperature) thermal comfort index. The study is applied in an urban area, with an intense flow of pedestrians, which is located in the city of Florianópolis, with a climate classified as Cfa. The area is close to bus terminals and is characterized by public and commercial buildings. The space was digitally modeled, generating three more variations of the original model. The first variation is added arboreal vegetation on all roads in the area, the second variation, this vegetation is replaced by an opaque element of the same proportion and in the last variation, all the vegetation existing in the original model is removed. Two typical days were analyzed, one in January, characterized by higher temperatures, and the other in July, with milder temperatures, at three times of the day, starting at nine in the morning, with an interval of three hours each. All models are compared with each other and the results showed that both the shading provided by trees and opaque elements are good alternatives for the reduction of  $T_{mrt}$  and better levels of comfort evaluated by the PET index. The model with opaque shading elements showed a positive result just below its insertion projection, while the arboreal vegetation insertion showed a less intense but more comprehensive positive result. The suppression of all vegetation caused a worsening in relation to the original model. The results show the importance of simulations of urban scenarios for managers and planners and can corroborate the elaboration of public policies focused on mitigating the effects of urban heating and preserving urban green spaces.

**Keywords:** Shading. Urban vegetation. Computational simulation. External thermal comfort. Urban microclimate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Radiação incidente em árvores .....	46
Figura 2 - Principais aspectos analíticos dos resultados da simulação.....	62
Figura 3 - Modelo de simulação do software .....	65
Figura 4 - Fluxograma do método .....	67
Figura 5 - Rosa dos ventos para a cidade de Florianópolis - Anual.....	71
Figura 6 - Rosa dos ventos para a cidade de Florianópolis - Verão e Inverno.....	71
Figura 7 - Localização de Florianópolis.....	72
Figura 8 - Localização da área analisada.....	73
Figura 9 - Revitalização do Largo da Alfândega .....	74
Figura 10 - Zoneamento urbano .....	75
Figura 11 - Localização das vias analisadas.....	76
Figura 12 - Vista aérea da área analisada .....	76
Figura 13 - Área do modelo original .....	77
Figura 14 - Demarcação de Vegetação Existente.....	79
Figura 15 - Área de projeção da área vegetada e do elemento de sombra opaco.....	82
Figura 16 - Rosa dos ventos para os dias 21/01 e 21/07. ....	83
Figura 17 - Ponto de comparação entre Dados Climáticos e ENVI-met.....	84
Figura 18 - Tipo de Modelos.....	85
Figura 19 - Locação de árvores do modelo representativo para o Modelo VEG.....	87
Figura 20 - Uso em meio urbano de <i>Terminalia catappa</i> , Rio de Janeiro - RJ.....	88
Figura 21 - Locação dos elementos de sombra para o Modelo V2S20m.....	89
Figura 22 - Fluxograma de horários de análise .....	91
Figura 23 - Temperatura do ar - dias 21/01 e 21/07 - Modelo ORG.....	97
Figura 24 - Umidade relativa do ar - dias 21/01 e 21/07 - Modelo ORG .....	98
Figura 25 - Velocidade do ar - dias 21/01 e 21/07 - Modelo ORG.....	100
Figura 26 - $T_{mrt}$ Planta h:1,5m - 21/01 - 9:00h.....	101
Figura 27 - $T_{mrt}$ Corte eixo x 103m - 21/01 - 9:00h .....	103
Figura 28 - $T_{mrt}$ Planta h:1,5m - 21/01 - 12:00h .....	104
Figura 29 - $T_{mrt}$ Corte eixo x 103m - 21/01 - 12:00h .....	105
Figura 30 - $T_{mrt}$ Planta h:1,5m - 21/01 - 15:00h.....	106
Figura 31 - $T_{mrt}$ Corte eixo x 103m - 21/01 - 15:00h .....	107

Figura 32 - T <sub>mrt</sub> Planta h:1,5m - 21/07 - 9:00h.....	108
Figura 33 - T <sub>mrt</sub> Corte eixo x 103m - 21/07 - 9:00h .....	109
Figura 34 - T <sub>mrt</sub> Planta h:1,5m - 21/07 - 12:00h.....	110
Figura 35 - T <sub>mrt</sub> Corte eixo x 103m - 21/07 - 12:00h .....	112
Figura 36 - T <sub>mrt</sub> Planta h:1,5m - 21/07 - 15:00h.....	113
Figura 37 - T <sub>mrt</sub> Corte eixo x 103m - 21/07 - 15:00h .....	114
Figura 38 - PET Planta h:1,5m - 21/01 - 9:00h.....	115
Figura 39 - PET Corte eixo x 103m - 21/01 - 9:00h .....	117
Figura 40 - PET Planta h:1,5m - 21/01 - 12:00h.....	118
Figura 41 - PET Corte eixo x 103m - 21/01 - 12:00h .....	119
Figura 42 - PET Planta h:1,5m - 21/01 - 15:00h.....	120
Figura 43 - PET Corte eixo x 103m - 21/01 - 15:00h .....	121
Figura 44 - PET Planta h:1,5m - 21/07 - 9:00h.....	122
Figura 45 - PET Corte eixo x 103m - 21/07 - 9:00h .....	123
Figura 46 - PET Planta h:1,5m - 21/07 - 12:00h.....	124
Figura 47 - PET Corte eixo x 103m - 21/07 - 12:00h .....	125
Figura 48 - PET Planta h:1,5m - 21/07 - 15:00h.....	126
Figura 49 - PET Corte eixo x 103m - 21/07 - 15:00h .....	127

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura mensal média para Florianópolis.....	68
Gráfico 2 - Umidade Relativa e temperatura de bulbo úmido .....	69
Gráfico 3 - Temperatura do solo em diferentes profundidades.....	69
Gráfico 4 - Radiação solar por área - Florianópolis .....	70
Gráfico 5 - Comparação entre Dados climáticos e ENVI-met para o dia 21/01 .....	95
Gráfico 6 - Comparação entre Dados climáticos e ENVI-met para o dia 21/07 .....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação atividade x metabolismo.....	49
Tabela 2 - Índices de <i>clo</i> .....	50
Tabela 3 - Relação de vegetação existente.....	79
Tabela 4 - PMV e PET, Percepção térmica e Grau de estresse psicológico .....	92
Tabela 5 - PET Calibrado para o clima Cfa .....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Área Comunitária / Institucional
AMC	Área Mista Central
APP	Área de Preservação Permanente
APL	Áreas de Preservação com Uso Limitado
ARR	Área Residencial Rural
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
AUE	Área de Urbanização Especial
AVL	Área Verde de Lazer
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i>
COST	Cooperação em Ciência e Desenvolvimento Técnico
EBM	<i>Energy Balance Model</i>
EPW	<i>EnergyPlus Weather</i>
ET	Temperatura Efetiva
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAF	Índice de área foliar
ICU	Ilha de Calor Urbana
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPTU	Imposto Territorial Urbano
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITS	Índice de Estresse Térmico
IVS	<i>Indexed View Sphere</i>
LAD	<i>Leaf Area Density</i>
MENI	<i>Munich Energy- Balance Model for Individuals</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Técnica Brasileira
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

PET	<i>Physiological Equivalent Temperature</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PVC	Policloreto de polivinila
PT	Temperatura Percebida
RAD	<i>Root Area Density</i>
SET	<i>Standard Effective Temperature</i>
TICEN	Terminal de Integração Rodoviário do Centro
TEP	Temperatura Equivalente Percebida
TRY	<i>Test Reference Year</i>
UC	Unidade de Conservação
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
RH	<i>Relative Humidity</i>
UTCI	Índice de Clima Térmico Universal

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_s$	absorção solar
°	graus
°C	graus Celsius
%	porcentagem
$C$	fluxo de calor convectivo
$clo$	<i>clothes</i> (vestimentas)
Cfa	Clima subtropical úmido
cm	centímetros
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
$D$	diâmetro
$\epsilon_g$	emissividade do globo
$E_D$	fluxo de calor latente
$E_{Sw}$	fluxo de calor devido à evaporação do suor
$E_{Re}$	soma dos fluxos de calor para aquecer e umidificar o ar inspirado
g/m <sup>3</sup>	grama por metro cúbico
h	hora
hPa	hectopascal
kg	quilograma
km	quilômetro
km/h	quilômetro por hora
$K$	radiação de ondas curtas
$K_{dir}$	radiação direta
$K_{dif}$	radiação difusa
$K_h$	radiação refletida do solo horizontal
$K_v$	radiação refletida em superfícies verticais
$L$	radiação de ondas longas
$L_d$	radiação de ondas longas que irradia para baixo
$L_h$	radiação de ondas longas que irradia em superfícies de solo horizontais
$L_v$	radiação de ondas longas que irradia em superfícies verticais
$L_s$	radiação de ondas longas que é emitida pelo organismo para o meio ambiente
$M$	atividade metabólica

m	metros
m <sup>2</sup>	metro quadrado
m <sup>3</sup>	metro cúbico
m/s	metros por segundo
<i>met</i>	atividade metabólica
n <sup>o</sup>	número
NO	monóxido de nitrogênio
NO <sup>2</sup>	dióxido de nitrogênio
<i>Iclo</i>	Índice de vestimentas
<i>R</i>	radiação líquida do corpo
<i>S</i>	fluxos de calor de armazenamento para aquecer ou resfriar a massa corporal
<i>T<sub>a</sub></i>	temperatura do ar
<i>T<sub>op</sub></i>	temperatura operativa
<i>T<sub>mrt</sub></i>	temperatura radiante média
<i>T<sub>g</sub></i>	temperatura do globo
<i>V<sub>a</sub></i>	velocidade do ar
<i>W</i>	produção de trabalho físico
W	Watt
W.m	Watt vezes metro
W/m <sup>2</sup>	Watt por metro quadrado
Wh/m <sup>2</sup>	Watt-hora por metro quadrado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	23
1.2	OBJETIVOS .....	27
<b>1.2.1</b>	<b>OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>27</b>
<b>1.2.2</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>28</b>
2.1	NORMAS DE USO DE VEGETAÇÃO E ÁREAS VERDES NO CENÁRIO URBANO .....	28
2.2	CLIMA URBANO E A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO .....	30
2.3	INSERÇÃO DE ELEMENTOS VEGETADOS AO MICROCLIMA URBANO .....	32
<b>2.3.1</b>	<b>Sistemas horizontais de vegetação.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Sistemas verticais de vegetação .....</b>	<b>34</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Arborização urbana.....</b>	<b>35</b>
2.4	VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS E AMBIENTAIS URBANAS PARA O CONFORTO TÉRMICO.....	37
<b>2.4.1</b>	<b>Temperatura do ar .....</b>	<b>38</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Temperatura radiante média.....</b>	<b>39</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Fluxo de ar – Ventos .....</b>	<b>40</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Temperatura do solo.....</b>	<b>41</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Umidade atmosférica.....</b>	<b>43</b>
<b>2.4.6</b>	<b>Radiação solar .....</b>	<b>44</b>
<b>2.4.7</b>	<b>Refletância das superfícies e Albedo .....</b>	<b>46</b>
<b>2.4.8</b>	<b>Evapotranspiração e Índice de área foliar .....</b>	<b>47</b>
2.5	VARIÁVEIS HUMANAS .....	49
<b>2.5.1</b>	<b>Taxa Metabólica - <i>met</i> .....</b>	<b>49</b>

2.5.2	<b>Roupas</b> .....	<b>50</b>
2.6	ÍNDICES DE ANÁLISE DO ESTRESSE E CONFORTO TÉRMICO HUMANO .....	51
2.7	ANÁLISE DO MICROCLIMA URBANO .....	56
<b>2.7.1</b>	<b>Tipos de Softwares</b> .....	<b>57</b>
2.7.1.1	<i>ENVI-met</i> .....	57
2.8	SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA .....	66
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>67</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA .....	68
3.2	APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ANÁLISE.....	72
3.3	DETERMINAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA .....	77
3.4	VARIAÇÃO DOS MODELOS .....	85
3.5	PERÍODO DE SIMULAÇÃO .....	90
3.6	ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO UTILIZADO E CALIBRAÇÃO.....	91
3.7	TRATAMENTO DOS DADOS DE SAÍDA .....	93
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>94</b>
4.1	DADOS CLIMÁTICOS INSERIDOS E RESULTADOS DO SOFTWARE .....	94
4.2	CENÁRIO ORIGINAL - MODELO ORG .....	96
<b>4.2.1</b>	<b>Temperatura do ar – Modelo ORG</b> .....	<b>96</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Umidade relativa – Modelo ORG</b> .....	<b>97</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Velocidade do ar – Modelo ORG</b> .....	<b>99</b>
4.3	TEMPERATURA RADIANTE MÉDIA .....	100
<b>4.3.1</b>	<b>Temperatura Radiante Média – 21 de janeiro</b> .....	<b>101</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Temperatura Radiante Média – 21 de julho</b> .....	<b>108</b>
4.4	ANÁLISE PET .....	115
<b>4.4.1</b>	<b>PET – 21 de janeiro</b> .....	<b>115</b>
<b>4.4.2</b>	<b>PET – 21 de julho</b> .....	<b>121</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>127</b>

5.1	LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	130
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	130
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>132</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Os centros urbanos estão em constante crescimento, dados da ONU - Organização das Nações Unidas (2018) apresentam que 86,6% da população brasileira reside no meio urbano e a projeção é para que em 2050 esse percentual chegue em 92,4%. Adicionalmente, o aumento da temperatura no microclima urbano é um problema que afeta cada vez mais esses ambientes. Em um estudo de ZHAO et al. (2014), para um clima úmido no leste dos Estados Unidos, os níveis de temperatura do ar se diferem com as do subúrbio ou do meio rural, podendo chegar a 3°C de diferença, dependendo das condições analisadas. As causas desse fenômeno podem ser direcionadas à grande impermeabilização do solo, ao uso inadequado dos revestimentos, à concentração de poluentes e à própria negligência com a vegetação.

Para compensar os impactos de temperaturas ambientais urbanas mais altas, várias são as formas de tentativa de redução de temperaturas nesse meio. Dentre várias tecnologias, o uso de materiais e revestimentos reflexivos, uso da vegetação, sistemas evaporativos e componentes térmicos são os mais aceitos e implementados (LONTORFOS; EFTHYMIU; SANTAMOURIS, 2018).

O Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC (2016) mostra que o aumento populacional e o aquecimento global são fatores que alteram diretamente a demanda por energia nas cidades. O aumento da temperatura do ar intensifica o consumo de eletricidade na medida em que eleva a necessidade de condicionamento do ar. Nas cidades, a sensação térmica é ainda agravada pelo fenômeno de ilhas de calor, no qual a temperatura média nas regiões urbanas fica acima da temperatura observada nos municípios vizinhos, menos urbanizados. As ilhas de calor ocorrem, principalmente, devido à elevada quantidade de asfalto e concreto, materiais que concentram calor, em contraposição à quantidade de árvores e áreas verdes, que amenizam a temperatura. Uma das estratégias para a adaptação das cidades que o relatório sugere para amenizar os efeitos de altas temperaturas nos centros urbanos é por meio de abordagens passivas, tais como o plantio de árvores, telhados verdes, revestimentos reflexivos e pavimentos permeáveis, minimizando assim o estresse térmico sobre todos os cidadãos.

Nesse sentido, Wamsler (2014) em suas considerações sobre cidades de modo global, afirma que a vegetação desempenha um papel fundamental para o funcionamento do tecido urbano, atuando como uma barreira natural para desequilíbrios climáticos. A degradação dessas barreiras naturais deixa o meio urbano vulnerável, assim como a vegetação, que é elemento

crucial para a geração de água subterrânea e estabilidade, permeabilidade e resfriamento do solo, ainda tem potencial de redução de temperatura do ar microclimática e auxilia na drenagem das águas pluviais. Danos ou destruição à vegetação urbana podem levar à redução do acesso dos cidadãos a locais de recreação e redução da qualidade do ar, estresse por calor, bem como aumento do risco de deslizamentos de terra. Harting et al. (2014) apontam que uma forma de incentivar o uso do espaço urbano pode ser através da vegetação, proporcionando ambientes naturais para promover a atividade física ao ar livre.

A falta de áreas verdes acaba deixando as cidades mais vulneráveis aos problemas atuais e futuros que poderão ser acentuados pelas mudanças climáticas, como o aumento das ilhas de calor, poluição do ar e inundações (PBMC, 2016). A qualidade do ar interna tem ligação direta com a escolha do modelo de construção das edificações. Roaf, Fuentes e Thomas (2001) afirmam que a construção naturalmente ventilada e aberta à umidade proporciona um ambiente externo saudável. Para que isso ocorra, é necessário que o ambiente externo também tenha boas condições para trocas de calor. O uso de elementos vegetados forma uma barreira natural contra a poluição local e a poeira. Erell e Tsoar (1997) reiteram a funcionalidade da vegetação em filtrar o ar em relação às partículas de poeira.

Em relação à saúde, Frumkin et al. (2017) alegam que o contato com a natureza oferece uma promessa considerável no tratamento de uma série de desafios, como obesidade, doenças cardiovasculares, depressão e ansiedade, que são algumas das prioridades na saúde pública. O contato com a natureza oferece uma promessa tanto como prevenção, quanto como tratamento ao longo da vida. As vantagens potenciais incluem baixos custos em relação às intervenções médicas convencionais, segurança e praticidade. Beyer et al. (2014) argumentam que níveis mais altos de área verde na vizinhança correspondem a melhores resultados de saúde mental. As associações entre espaço verde e saúde mental são significativas e consideráveis, persistindo com diferentes técnicas de medição. Além disso, o efeito estimado do espaço verde ambiental é semelhante em magnitude ao de outros contribuintes bem conhecidos e estudados para a sintomatologia de depressão, ansiedade e estresse.

Javadi (2021) reitera que em estudos qualitativos sobre a relação entre espaço verde e saúde pública, pode-se constatar que as características dos espaços verdes podem criar diferentes compreensões do espaço, o que provoca um comportamento especial e acaba por levar à saúde pública. A qualidade do espaço verde é percebida através do ambiente, assim, o projeto de espaços verdes urbanos deve levar em consideração os requisitos dos usuários, o que

pode levar a uma maior satisfação do usuário com os espaços verdes urbanos, bem como a frequência e a duração do uso.

No que diz respeito ao conforto térmico em ambientes externos, ele pode ser alcançado quando os seguintes fatores básicos são equilibrados: temperatura do ar, velocidade do vento, umidade, atividade, roupas e radiação solar (NG, 2009). As diferenças do nível de conforto podem ser previstas por alguns índices, criados e adaptados no decorrer dos últimos anos, que levam em conta esses fatores (XIE et al., 2019). Hamdi et al. (2020) expõem que a partir de 2010, grupos de modelagem climática global e regional, formados por formuladores de políticas, planejadores urbanos e cientistas, estão iniciando juntos a implementar parametrizações urbanas no componente do modelo de superfície terrestre de seus modelos climáticos. O objetivo é entender e monitorar as interações e o *feedback* entre as mudanças climáticas e o ambiente urbano para encontrar as opções de adaptação ou mitigação mais adequadas. No entanto, ainda não é possível capturar certas características de mesoescala da ilha de calor urbana. Assim, há necessidade de um detalhamento do uso do solo com áreas urbanas e parametrização do dossel urbano ao projetar o clima futuro desses locais, requerendo projeções climáticas de alta resolução espacial.

Os índices de conforto térmico fornecem um meio de qualificar a influência do microclima em relação à sensação de frio, calor ou bem estar térmico humano e ajudam a formar diretrizes para um desenvolvimento urbano sustentável (COCCOLO et al., 2016). São aplicados a medições *in loco* ou em estudos com simulações, entretanto, é vista a necessidade de pesquisas em diferentes climas para que esses índices sejam testados e validados com variações de parâmetros.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A Organização Mundial da Saúde (OMS), (2016) aponta que para tornar um ambiente urbano verde em um ativo para todas as populações, os formuladores de políticas públicas precisam contar com medidas e indicadores objetivos e comparáveis que reflitam a provisão de espaços verdes urbanos em várias comunidades e países e ajudem a identificar áreas onde intervenções direcionadas são necessárias. A aplicação de indicadores harmonizados para medir a provisão de espaços verdes também pode ajudar a avaliar os efeitos de intervenções políticas direcionadas. Esses indicadores devem ser baseados em evidências, definidos por unanimidade e universalmente aplicáveis em várias populações e condições ambientais.

Estudos recentes, como apresentados por Liu et al. (2020), Morakinyo et al. (2017), Antoniadis, Katsoulas e Kittas (2018) e Gatto et al. (2020), revelam que a vegetação urbana pode ser considerada como uma das ações mais eficazes por suas características de resfriamento por sombreamento, redirecionamento de fluxos de ar, interceptação de precipitações e evapotranspiração. O uso de elementos vegetados para o envoltório dos edifícios urbanos pode trazer benefícios na mitigação do calor urbano (LIU et al., 2021). Taha (1997) afirma que a redução da temperatura da superfície também reduz a intensidade da radiação de ondas longas. As temperaturas do ar e a favor do vento seriam mais baixas devido a menores fluxos de calor por convecção de superfícies mais frias. Essas reduções de temperatura podem ter impactos significativos no consumo de energia de refrigeração em áreas urbanas, fato de particular importância em cidades de clima quente.

As áreas urbanas, com extensas superfícies impermeáveis, geralmente retratam mais escoamento do que suas áreas rurais. A água de escoamento é drenada rapidamente e, a longo prazo, menos água superficial permanece disponível para evapotranspiração, afetando assim o balanço energético de superfície urbana (GRIMMOND; OKE, 1991). Santamouris (2014) aponta os telhados com um excelente espaço para a aplicação de técnicas de mitigação das altas temperaturas urbanas, tendo em conta as dificuldades de implementação de tecnologias de mitigação de grande escala na superfície terrestre das cidades, como o aumento da superfície total de áreas verdes.

Contudo, Lai et al. (2020) afirmam que os espaços abertos urbanos com boas condições de conforto térmico ao ar livre, combinando os fatores que o influenciam como temperatura do ar, temperatura média radiante, radiação solar, umidade relativa e velocidade do ar buscando uma neutralidade térmica, atraem os cidadãos e aumentam a vitalidade de uma cidade. Portanto, o conforto térmico ao ar livre é uma questão de pesquisa importante e tema de um número crescente de estudos. Ainda propõem fatores de influência, como fatores físicos, fisiológicos e psicológicos com influências diretas, e fatores comportamentais, pessoais, sociais e culturais, história térmica, local e aliestesia como influências indiretas. Sendo que muitos desses ainda não são passíveis de análise com simulações computacionais.

As árvores têm diferentes comportamentos, dependendo de sua espécie. Em um estudo apresentado por Dandou et al. (2021), a presença de árvores caducas de folha larga nas ruas tem um impacto de diminuir a temperatura radiante média, comparada a uma variação sem a vegetação. Ressaltam também, uma redução evidente da temperatura da superfície, importante para o conforto térmico dos pedestres. Essa redução da temperatura radiante média é muito

importante no que diz respeito à sua implicação no conforto térmico dos pedestres, atividades urbanas ao ar livre, tanto como, na redução da temperatura da superfície devido à sua implicação na economia de energia. É observado como um dos fatores desse resultado o sombreamento proporcionado pela vegetação, no entanto, há necessidade de qualificar o tipo de sombreamento e a origem desse sombreamento, sendo vegetado ou artificial.

Santamouris (2015) afirma que o aquecimento urbano tem um sério impacto energético e ambiental. Além do importante aumento do ozônio troposférico e de outros poluentes, a compilação dos estudos energéticos existentes relacionados ao aquecimento urbano mostrou que o pico de demanda de eletricidade por grau de temperatura pode aumentar entre 0,45 e 4,6%, enquanto o aumento correspondente do pico de demanda por pessoa é perto de 21 ( $\pm 10,4$ ) W por grau de aumento de temperatura. Paralelamente, o consumo de eletricidade por hora, diária ou mensal, aumenta entre 0,5% e 8,5% por grau de elevação da temperatura. Além disso, a penalidade média de resfriamento induzida pela ilha de calor urbana, em edifícios de referência de diferentes tipos, é próxima de 13,1%. As altas temperaturas externas têm um impacto direto nas condições de conforto internas e externas.

Em geral, o processo de urbanização é marcado por mudanças na cobertura do solo devido à substituição de ecossistemas naturais por estruturas urbanas (CARVALHO; SZLAFSZTEIN, 2019).

O sombreamento pode ser obtido não apenas por árvores, mas também por dispositivos de sombreamento, como uma malha leve. Recentemente, os tecidos de malha de sombra têm sido usados extensivamente para culturas agrícolas em estufas como apontam estudos de Möller et al. (2004). Embora o uso de sombreamento de tecido também seja bastante comum em espaços abertos de algumas cidades da zona árida, como apontado por Shashua-Bar, Pearlmutter e Erell (2009), seu efeito no microclima urbano ainda não foi explorado em relação a outras estratégias ambientais.

Observados os efeitos e as características expostas, onde o uso de elementos vegetados nos centros urbanos pode trazer influências de caráter energético, sanitário e ambiental ao microclima urbano, é da mesma forma pertinente relacioná-los à percepção desse ambiente externo com o usuário. Sabendo que a vegetação requer manutenção e cuidados, também é levado em consideração se outro elemento de sombreamento teria efeitos aproximados. É importante entender e identificar a relação que o sombreamento da vegetação ou de elementos opacos, juntamente com seus parâmetros, pode alterar essa percepção do clima. Para que seja possível avaliar o conforto térmico ao ar livre *in loco*, geralmente são realizadas análises

seguindo dois métodos em combinação; medições micro meteorológicas ou modelagem e pesquisa de questionário guiada ao usuário (GATTO et al., 2020). Por outro lado, a análise por meio computacional, consegue simular o microclima urbano e padrões específicos de usuários com dados de entrada como idade, sexo, vestimentas e atividade metabólica e arquivos climáticos. Para se qualificar esses resultados dessas análises, tanto *in loco*, como computacional, são empregados índices de conforto que relacionam os resultados e são representados em faixas de conforto ou estresse térmico.

Em relação aos índices de conforto, Johansson et al. (2014) comparam os mais utilizados e indicam somente dois que foram criados especificamente para aplicação em ambientes externos, o índice PET (Temperatura Fisiológica Equivalente) e o índice UTCI (Índice de Clima Térmico Universal), apesar de já se encontrar uma grande parte de estudos com outros índices aplicados ao meio externo no entanto, nenhum deles conta com alguma variável diretamente ligada à elementos vegetados, como índice de área foliar ou capacidade de evapotranspiração das plantas, por exemplo. Dentro desse contexto, os softwares foram se adaptando e atualmente conseguem inserir dados de vegetação, que por sua vez, influenciam as variáveis ligadas diretamente aos índices, tornando viável e possível qualificar a ação desses elementos no meio urbano por meio de simulações computacionais.

Notado isso e a falta de trabalhos voltados ao clima específico de Florianópolis, essa pesquisa busca uma melhor compreensão acerca da percepção do pedestre ao nível da rua, por meio de análises de índices de conforto e variáveis microclimáticas, em relação à aplicação de elementos de sombreamento opacos e elementos vegetados e como eles poderiam influenciar para alcançar essa mitigação do calor urbano, por meio de variações de um cenário original. Consequentemente, esse estudo servirá como recurso a nível da ciência para oferecer opções para gestores e planejadores definirem ações, melhorando a qualidade de vida dos usuários, além de contribuir para o entendimento dos impactos e efeitos dessas opções de mitigação do calor urbano.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é analisar, por meio de simulações computacionais, o impacto de elementos vegetados e de elementos de sombreamento opacos no microclima urbano a nível do pedestre com base em índices de análise de percepção de estresse e conforto térmico, na cidade de Florianópolis.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a concretização do objetivo geral desta pesquisa, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- a) Explorar e entender as possibilidades da aplicação de elementos opacos de sombreamento e de elementos vegetados no microclima urbano.
- b) Compreender os índices de estresse e conforto térmico mais utilizados nas pesquisas acadêmicas e selecionar o mais adequado às condições da pesquisa.
- c) Analisar o impacto da aplicação de elementos vegetados e de elementos de sombreamento opacos, dentro de três variações hipotéticas de um contexto urbano, em relação à temperatura radiante média e à um índice de estresse térmico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura acerca dos conceitos principais que se referem ao estudo da percepção térmica em ambientes urbanos externos, suas variáveis e os índices de análise em relação ao estresse térmico, como ele é visto pelas normativas da cidade e ao fim, são apresentadas as formas de análises do microclima urbano e softwares para simulação desse meio.

### 2.1 NORMAS DE USO DE VEGETAÇÃO E ÁREAS VERDES NO CENÁRIO URBANO

As normativas referente à vegetação no âmbito urbano são direcionadas pelo Plano Diretor de cada cidade. No caso da cidade de Florianópolis, um dos seus objetivos é organizar a ocupação do território municipal de forma a proporcionar qualidade de vida para o conjunto da população, baseado nos valores sociais e garantir o desenvolvimento sustentável, praticado em estreita correlação com o meio ambiente e o patrimônio cultural (PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS, 2013).

Dentro do zoneamento urbano, a Prefeitura de Florianópolis, (2013) designa algumas áreas com mais ou menos restrições referentes ao tipo de vegetação. A Área de Preservação Permanente – APP são espaços com caráter de proteção, que podem ou não estar recobertos por vegetação e possuem função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. Unidade de Conservação – UC são espaços territoriais e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituídos pelo Poder Público, com objetivos de conservação, sendo dotadas de limites definidos, colocados sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção. Áreas de Preservação com Uso Limitado – APL são os espaços territoriais que, em virtude de suas características de declividade, do tipo de vegetação ou da vulnerabilidade aos fenômenos naturais não apresentam condições adequadas para suportar determinadas formas de uso do solo sem prejuízo do equilíbrio ecológico ou da paisagem natural. Área Residencial Rural – ARR, onde coexistem usos urbanos e rurais de pequeno porte suportados por uma estrutura viária e fundiária rural, destinados à produção agrícola e agropecuária familiar. Área de Urbanização Especial – AUE, grandes áreas urbanizáveis a partir de projeto amplo, que reserva setor predominante para

preservação ambiental e adensa a área remanescente, criando novas centralidades caracterizadas pela mescla de funções e espaços humanizados. Área Verde de Lazer – AVL, representados por espaços urbanos ao ar livre de uso e domínio público que se destinam à prática de atividades de lazer e recreação, privilegiando quando seja possível a criação ou a preservação da cobertura vegetal. Seguindo uma tendência mundial, Florianópolis possui, através da Lei complementar nº 480, de 20 dezembro de 2013 (PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS, 2013), uma política pública como incentivo fiscal. Para cada ação com foco na sustentabilidade, a lei determina um percentual de desconto no IPTU (Imposto Territorial Urbano), a arborização e a instalação de telhados verdes junto a outras ações podem diminuir até 5% do valor cobrado pelo órgão, embora pouco abrangente em ações que poderiam melhorar o microclima urbano. A Lei Complementar nº 651, 23 de novembro de 2018 (PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS, 2018) trata no Artigo 2º que somente será admitido como telhado verde no município, cuja cobertura seja composta basicamente pelas seguintes camadas: impermeabilização; proteção contra raízes; drenagem; filtragem; substrato; e vegetação, ainda exige que os materiais sintéticos que vierem a ser utilizados na construção de telhados verdes devem ser atóxicos. No Artigo 3º é indicado que a área ocupada com telhado verde será considerada, para todos os efeitos, como tendo as mesmas características de área permeável, sem especificação do tipo de telhado verde.

Através do programa do Cidades+Verdes, o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2021), que tem o objetivo principal de ampliar a quantidade e a qualidade das áreas verdes urbanas no país, indica que na maior parte das cidades brasileiras a expansão urbana não é acompanhada de processos de planejamento e gestão satisfatórios, gerando, entre outras consequências, cenários de degradação social e ambiental que afetam direta e negativamente a qualidade de vida da população. É fundamental um olhar atento dos gestores públicos para essas questões, uma vez que a importância das áreas verdes urbanas vai além do aspecto contemplativo, pois estão intimamente relacionadas aos serviços ecossistêmicos essenciais à saúde e à qualidade de vida nas cidades. O Programa também aponta que a falta de informações quali-quantitativas sobre áreas verdes urbanas existentes nos municípios brasileiros e de parâmetros e indicadores relacionados ao tema para apoiar a gestão ambiental urbana são grandes obstáculos para a resolução dos problemas advindos da expansão urbana. O MMA ainda aponta que no Brasil há poucas informações consolidadas sobre a cobertura vegetal nas áreas urbanas, sendo que os estudos realizados são dispersos e, em geral, não levam em conta

uma metodologia padronizada, reforçando a necessidade de conceituação das tipologias de áreas verdes urbanas e definição de diretrizes e indicadores que orientem suas avaliações.

O benefício econômico com a criação de políticas públicas voltadas ao incentivo de uso de vegetação deve ser considerado no planejamento urbano. Benefícios como a atração e retenção de força de trabalho qualificada, em função da melhor qualidade de vida oferecida pelas cidades que realizam melhor gestão de suas áreas verdes. Soma-se a isto, que ambientes agradáveis, arborizados e com abundância de espaços verdes, geralmente, impactam positivamente a valorização imobiliária desses locais, atraindo residentes e investimentos, além de possibilitar sua sustentabilidade econômica (TEEB, 2010).

## 2.2 CLIMA URBANO E A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO

A urbanização e as mudanças resultantes encontram sua expressão visível no chamado tecido urbano. O tecido urbano é caracterizado por características físicas distintas, que se referem a aspectos como densidade populacional, cobertura do solo e vegetação, detalhes arquitetônicos, infraestrutura, organização das estruturas no espaço e a relação entre edificações e aspectos topográficos (FEITOSA et al., 2021). O conforto térmico é fundamental para a qualidade do ambiente urbano. Além de seu impacto direto sobre os pedestres, um ambiente externo termicamente desconfortável pode exacerbar a dependência de espaços internos climatizados, aumentando o consumo de energia e as emissões atmosféricas relacionadas (PEARLMUTTER; BERLINER; SHAVIV, 2006).

Johansson et al. (2014) explicam que o conforto térmico ao ar livre é alterado pela vegetação por meio de processos de evapotranspiração, reflexão do sol, proteção solar (sombreamento) e alteração do fluxo do vento. Especificamente, a vegetação fornece resfriamento transpiracional porque a energia solar absorvida causa um aumento do calor latente (a água da vegetação é evaporada para a atmosfera), resfriando as superfícies das folhas e o ar ao seu redor.

Dimoudi e Nikolopoulou (2003) afirmam que o efeito microclimático das árvores é obtido por meio de vários processos como a redução de ganhos de calor solar em janelas, paredes e telhados por meio de sombreamento, a redução da troca de ondas longas do edifício com o céu à medida que as temperaturas da superfície do edifício diminuem devido ao sombreamento, a redução do ganho de calor condutivo e convectivo pela redução das temperaturas de bulbo seco por evapotranspiração das plantas durante o verão, processo este,

que as plantas fazem a troca de energia com o ar e o aumento do resfriamento latente pela adição de umidade ao ar por meio da evapotranspiração. No entanto, esses fatores dependem das características da vegetação e do solo.

A vegetação pode dar uma contribuição substancial para o conforto térmico humano, mesmo quando seu efeito sobre a temperatura do ar é desprezível. A troca radiante costuma ser o fator dominante que afeta o conforto térmico. A vegetação, portanto, contribui para o conforto não apenas protegendo uma pessoa diretamente, mas também reduzindo a emissão de ondas longas das superfícies e limitando a quantidade de radiação solar refletida delas (SHASHUABAR; PEARLMUTTER; ERELL, 2011).

Krebs e Johansson (2021) discutem resultados para a cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, onde foi analisado o desempenho de telhados verdes em ambiente urbano arborizado. Os autores afirmam que telhados verdes podem ter um melhor efeito de resfriamento quando estão em um local parcialmente sombreado por árvores. No verão, o telhado verde no local original sem vegetação levou a uma diminuição de 2,8 °C na temperatura operativa máxima, em comparação com o telhado de telha cerâmica. Quando a mesma comparação foi repetida no local arborizado, o telhado verde levou a uma diminuição de 4,3 °C na mesma variável, em comparação com o telhado de telha cerâmica. No inverno, a telha cerâmica e os telhados verdes tiveram basicamente o mesmo desempenho e o local com vegetação resultou em um ligeiro aumento no desconforto pelo frio interno. Os autores ainda reiteram que, no que diz respeito ao índice de área foliar adequado, tanto do telhado verde quanto das árvores, uma compensação deve ser encontrada entre a sombra no verão e o acesso solar no inverno.

Yang et al. (2019) mostram que o impacto da vegetação em modelos de avaliação de plantas em microclimas está principalmente relacionado à temperatura, umidade, radiação, vento e dispersão de poluentes através da fotossíntese e respiração que levam à conversão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e oxigênio, da transpiração que afeta a temperatura e a umidade do ambiente, da atenuação da radiação de ondas curtas e da produção de uma força de arrasto que afeta a distribuição do fluxo de ar e a deposição/absorção de poluentes atmosféricos.

Alguns efeitos negativos também podem ser encontrados com o uso da vegetação em meio urbano como exposto por Escobedo e Nowak (2009), como emissões biogênicas de compostos orgânicos voláteis pelas árvores, no entanto, os autores apresentam que dependendo da espécie de árvore, pode ser compensado pelos efeitos positivos associados à sua presença. Ould-Dada (2002) aponta a influência das condições meteorológicas na ressuspensão de

partículas finas suspensas na superfície das árvores. Cariñanos, Casares-Porcel e Quesada-Rubio, (2014) alertam sobre os índices de alergenicidade das vegetações urbanas, que se forem aplicadas de forma errada podem trazer malefícios à saúde do meio urbano. Também apresentam que o manuseio correto, as diversidades taxonômicas, morfológicas e biológicas podem ajudar a minimizar os impactos de espécies altamente alergênicas. Conforme Sousa-Silva et al. (2021), os diferentes padrões espaciais de risco humano de exposição ao pólen alergênico são de importância primordial para a saúde pública e o planejamento urbano. Com esse conhecimento, os alérgicos podem evitar áreas de alto risco e os planejadores urbanos de árvores podem fazer seleções de espécies bem informadas. Ainda mais importante, faltam referências confiáveis para a alergenicidade de árvores. Diferentes fontes de dados, para a mesma cidade e as mesmas espécies de árvores e gêneros, divergem e resultam em cenários de risco de alergenicidade muito diferentes. Akbari, Pomerantz e Taha (2001) apontam problemas potenciais associados às árvores, as quais emitem compostos orgânicos voláteis que agravam o problema da poluição atmosférica. Obviamente, a seleção de árvores de baixa emissão deve ser considerada em um programa de plantio de árvores em grande escala.

Alvey (2006) aponta a importância da biodiversidade que deve haver na floresta urbana, apontando o inventário de árvores, aliado às tecnologias já existentes, como uma ferramenta inicial para um gerenciamento eficiente. Ao plantar árvores em contexto urbano, as espécies nativas devem ser sempre preferidas, mas as cultivares e as espécies não nativas que não são invasivas também devem ser levadas em consideração. Visto que deve haver um cuidado no emprego de espécies exóticas, o que pode aumentar o risco de introdução de pragas exóticas.

### 2.3 INSERÇÃO DE ELEMENTOS VEGETADOS AO MICROCLIMA URBANO

A melhora do nível de estresse e ansiedade do ser humano em relação à introdução de elementos vegetados já vem sendo estudado em ambientes internos, demonstrando resultados significativas com experimentos com paredes verdes aplicadas em partes do espaço interno (YEOM; KIM; HONG, 2021). Já no ambiente externo essa inserção de elementos vegetados pode ocorrer em três formas mais abrangentes, sistemas horizontais de vegetação, sistemas verticais de vegetação e arborização urbana.

### 2.3.1 Sistemas horizontais de vegetação

Os telhados verdes são utilizados há muito tempo, lembrando dos famosos Jardins Suspensos da Babilônia, construídos cerca de 500 a.C. e nos tempos atuais vêm sendo utilizados como uma ferramenta eficiente para lidar com o rápido processo de urbanização em muitos países. Cascone et al. (2018) apresentam que os telhados verdes são amplamente classificados em telhados verdes intensivos, semi-intensivos e extensivos. Os telhados verdes intensivos são caracterizados por uma espessa camada de substrato que pode variar de 20 a 200cm, possuir grande variedade de plantas, alta manutenção, alto custo de capital e têm maior peso. Por possuir uma profundidade maior do solo, a determinação de plantas pode ser mais diversa, incluindo arbustos e pequenas árvores. Portanto, normalmente requerem alta manutenção na forma de fertilização, remoção de ervas daninhas e irrigação. Já os telhados verdes extensos são caracterizados com fina camada de substrato, menos que 15 cm, baixo custo de capital, baixo peso e manutenção mínima. Devido à fina camada de substrato, telhados extensos podem acomodar apenas tipos limitados de tipos de vegetação, incluindo gramíneas, musgo e algumas plantas suculentas. São sistemas usualmente utilizados em situações em que nenhum suporte estrutural adicional é desejado. Os telhados verdes semi-intensivos acomodam pequenas plantas herbáceas, coberturas do solo, gramíneas e pequenos arbustos devido à camada de substrato moderadamente espessa. Esses telhados requerem manutenção frequente, além de sustentar altos custos de capital.

Berndtsson (2010) e Mentens, Raes e Hermy (2006) esclarecem o papel dos telhados verdes com benefícios na gestão das águas pluviais, atuando conforme o nível de substrato, na retenção dessas águas e no atraso para o escoamento além de realizar o processo de evapotranspiração, sugerindo telhados verdes como uma alternativa complementar para lidar com esse problema. Feitosa e Wilkinson (2016) também destacam a eficiência da retenção dessas águas pluviais e salientam que a atenuação da taxa de fluxo por telhados verdes está ligada à profundidade ideal do solo e o quanto uma estrutura existente pode suportar. Já que no caso de *retrofit*, na maior parte dos casos, a estrutura não é pensada para suportar tal peso. Há também a relação do quanto úmido está esse solo antes dos eventos de pluviosidade de pico, que podem comprometer a funcionalidade do telhado verde em relação ao escoamento. Saadatian et al. (2013) demonstram o potencial de *retrofit* dos telhados verdes e consideram não apenas uma abordagem sustentável para o desenvolvimento de novos edifícios, mas também como um meio de adaptação adequado para enfrentar as crises de energia, bem como

para cobrir os problemas de isolamento insuficiente em edifícios antigos. Kolokotsa, Santamouris e Zerefos, (2013) evidenciam que telhados verdes podem contribuir consideravelmente para a melhoria do ambiente urbano e, ao mesmo tempo, reduzir a demanda de energia. Uma vez que as altas temperaturas ambientais observadas intensificam o problema energético das cidades, deterioram as condições de conforto, colocam em risco a população vulnerável e amplificam os problemas de poluição, todas as soluções disponíveis devem ser examinadas a fim de melhorar o microclima térmico urbano. Além disso, os telhados verdes demonstram benefícios em relação à poluição sonora urbana, à poluição do ar e são vistos como uma ferramenta para aumentar o apelo estético de qualquer edifício (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

A cobertura do solo também tem efeitos na percepção humana do clima. O uso da vegetação ao invés de pavimentação, exerce variações na temperatura radiante e no albedo, desempenhando um papel importante no estresse térmico total em uma pessoa. O uso de vegetação como cobertura de superfície mostra reduzir drasticamente esse estresse para qualquer tipo de vegetação (SNIR; PEARLMUTTER; ERELL, 2016).

### **2.3.2 Sistemas verticais de vegetação**

Köhler (2008) aponta a facilidade na implantação de sistemas verticais de vegetação nas edificações por não ser preciso muito espaço de solo, ter baixos custos de implantação, dependendo do método utilizado, e pelo potencial de cobrimento maior do que os telhados verdes, considerando centros urbanos mais densos. Os sistemas verticais de vegetação, comumente chamados de paredes verdes, são subdivididos por Manso e Castro-Gomes, (2015) em dois grupos principais, fachadas verdes e paredes vivas. As fachadas verdes baseiam-se na aplicação de plantas trepadeiras ou penduradas ao longo da parede. As plantas podem crescer para cima na superfície vertical, como os exemplos tradicionais, ou crescer para baixo na superfície vertical, caso sejam penduradas a uma certa altura. As paredes vivas são uma área de inovação bastante recente na área do revestimento de paredes. Eles surgiram para permitir a integração de paredes verdes em edifícios altos. As paredes vivas permitem uma cobertura rápida de grandes superfícies e um crescimento mais uniforme ao longo da superfície vertical, atingindo áreas mais elevadas e adaptando-se a todos os tipos de edifícios. Eles também permitem a integração de uma ampla variedade de espécies de plantas. As paredes vivas ainda podem ser contínuas, baseadas na aplicação de telas leves e permeáveis nas quais as plantas são

inseridas individualmente ou modulares, os elementos têm uma dimensão específica, que incluem os meios de cultivo onde as plantas podem crescer. Cada elemento é sustentado por uma estrutura complementar ou fixado diretamente na superfície vertical. Em uma comparação entre a aplicação em telhados verdes e fachadas verdes, a taxa de cobertura das superfícies verticais é um fator chave no desempenho de captura de materiais particulados do ar apontado por Viecco et al. (2021), obtendo um maior impacto na qualidade do ar ao nível do pedestre.

### 2.3.3 Arborização urbana

A arborização urbana se dá pelo plantio de árvores no meio urbano, tanto em praças e parques, como em espaços centrais ou laterais de vias de trânsito de pedestres ou veículos. Akbari, Pomerantz e Taha (2001) dividem os benefícios das árvores urbanas como dois efeitos principais em diretos, sombreamento de edifícios e indiretos, resfriamento ambiente efeito chamado de floresta urbana. Árvores de sombra interceptam a luz do sol antes que ela aqueça um prédio. A floresta urbana resfria o ar por evapotranspiração, onde ocorre um processo de troca de energias com a junção do processo de evaporação e transpiração das plantas. As árvores também diminuem a velocidade do vento sob sua cobertura e protegem os edifícios das brisas frias do inverno. No verão também diminuem a velocidade do ar e dependendo da disposição podem direcionar os ventos. As árvores de sombra urbanas oferecem benefícios significativos ao reduzir o ar-condicionado dos prédios, diminuir a temperatura do ar e, assim, melhorar a qualidade do ar urbano ao reduzir a poluição e desempenhando papel importante no sequestro de CO<sub>2</sub>.

Em um estudo feito por Erlwein, Zölch e Pauleit (2021), que compara diferentes níveis de densidades de arborização e edificações em cenários hipotéticos que são classificados como realistas e otimistas, alcançam resultados com o plantio de árvores em pontos específicos, a diminuição do nível em um dos índices que apresenta a percepção térmica de conforto do ser humano, o *Physiological Equivalent Temperature* – PET, em dias quentes entre 7,6 a 9 °C para o cenário realista e 8,6 a 10 ° para o otimista. Ainda apontam que a relação dos impactos entre telhados verdes e fachadas verdes para os resultados de resfriamento deste índice são insignificantes, sendo limitado à proximidade das fachadas dos edifícios.

Priya e Senthil (2021) afirmam que as árvores são uma excelente forma de controlar o conforto térmico ao ar livre para mitigar os efeitos das ilhas de calor urbana e podem ser plantadas de maneira planejada em locais onde o conforto térmico dos pedestres é necessário.

Mas alertam que a superlotação de plantas deve ser evitada em áreas de movimento de pedestres, pois impede o fluxo de vento causando maior umidade e estagnação do ar, o que resulta em mais desconforto térmico para o homem. Ainda complementam que um dossel altamente denso pode levar a uma incidência pobre de radiação solar e a problemas de saúde associados à deficiência de vitamina D. Oke (1989) aponta que, apesar de ser objeto de estudo frequente, a floresta urbana tem melhores efeitos dependendo de variados fatores como tamanho ideal, combinação de espécies de árvores, macroclima e morfologia da cidade, por exemplo. É necessária uma compreensão abrangente dos mecanismos subjacentes, especialmente os equilíbrios de energia e água e o campo de vento tridimensional, para que modelos conceituais e numéricos válidos possam ser construídos para aplicação em ambientes construídos específicos.

Abreu-Harbach, Labaki e Matzarakis (2015) apontam que características da árvore como altura, cobertura verde, forma e permeabilidade da copa podem influenciar o ambiente térmico. Seus estudos analisaram os efeitos de doze espécies arbóreas, confirmando que os efeitos influenciam significativamente o conforto térmico humano. Ainda indicam que o planejamento deve ser apropriado para as condições climáticas recentes e futuras mudanças climáticas. Plantar árvores adequadas ao redor dos prédios, nas calçadas, vias de pedestres, praças e parques pode ser útil no combate às mudanças climáticas em microescala. A avaliação das diferentes espécies arbóreas comumente encontradas e as estratégias de arborização durante a urbanização das cidades são informações importantes para o planejamento urbano e a manutenção do microclima urbano. Além disso, o plantio de árvores com árvores típicas da região que fornecem sombra em sua maioria é uma solução prática e econômica, e é considerada uma alternativa de eficiência energética.

Com seu estudo analisando cinco espécies arbóreas de forma experimental, Abreu (2008) evidencia que, com elementos arbóreos em um microclima, há uma melhora nas condições de conforto entre o período das 11h às 17h. Ainda indica que o agrupamento desses elementos é capaz de intensificar o trabalho de termorregulação da vegetação.

Um fator que deve ser levado em conta no projeto de arborização urbana é a segurança. Estudos de Luymes e Tamminga (1995) apresentam cinco princípios para o planejamento e projeto de vias verdes e seguras: 1) visibilidade de outras pessoas, compreendendo a capacidade de avaliar e reconhecer estranhos e de examinar visualmente as direções e áreas próximas à posição de alguém são fatores-chave para aumentar a percepção de segurança dos usuários, especialmente aqueles que se sentem mais vulneráveis à agressão ou assédio; 2) visibilidade

por outras pessoas, que afirma que as pessoas se sentem mais seguras nas cidades quando não estão isoladas do contato com o domínio urbano maior; 3) escolha e controle, o controle pode se manifestar nas escolhas de movimento livre dentro de um lugar, para evitar lugares isolados ou aprisionados e para escapar de encontros sociais ameaçadores ou irritantes; 4) consciência ambiental e legibilidade, esses princípios relacionados apontam para a importância de permitir que o usuário esteja no controle, de saber como evitar e escapar de locais potencialmente perigosos e estar ciente das conexões e rotas para locais seguros e; 5) solidão sem isolamento, este princípio faz a distinção clara entre a experiência positiva de solidão e a experiência negativa de isolamento, quase por definição, as vias verdes urbanas são lugares para a natureza na cidade, lugares onde às vezes é possível alcançar a solidão e o retiro, sem deixar o domínio público. Ainda em relação à segurança, Kuo e Sullivan, (2001) e Kuo e Sullivan, (2016) afirmam que a relação entre mais árvores e grama ao redor de seus edifícios exibiram um comportamento menos agressivo, e seus edifícios foram associados a menos crimes, relacionando vegetação à sensação de segurança.

#### 2.4 VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS E AMBIENTAIS URBANAS PARA O CONFORTO TÉRMICO

À medida que ocorre a urbanização, materiais impermeáveis como concreto e asfalto substituem a vegetação natural e as superfícies originais. Essas mudanças alteram os fluxos de energia térmica e reduzem a evapotranspiração, diminuindo os níveis de umidade das superfícies. Além disso, as limitações do fluxo de ar em ambientes urbanos densos, bem como o calor produzido e expelido pela ocupação de edifícios e atividades humanas, contribuem para o efeito de ilhas de calor urbanas (FEITOSA et al., 2021).

ASHRAE 55 (2017) define que o conforto térmico é aquela condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico, porque existem grandes variações, tanto fisiológica como psicologicamente, de pessoa para pessoa, é o que torna difícil satisfazer a todos em um espaço e as condições ambientais necessárias para o conforto não são as mesmas para todos. GIVONI et al. (2003) alertam que a análise dos efeitos da combinação de vários elementos climáticos pode ser mais complexa em estudos de conforto ao ar livre do que em condições internas, devido às interações peculiares entre os elementos climáticos em locais e estações específicas. Este fator pode apresentar problemas específicos no desenvolvimento de modelos matemáticos por regressão de múltiplos fatores.

No contexto do planejamento urbano responsivo ao clima, há uma grande necessidade de definir atributos viáveis de projeto urbano, que sejam adequados às necessidades dos usuários de espaços exteriores. No entanto, há uma grande subjetividade envolvida no que diz respeito à avaliação da percepção térmica (KRÜGER; DRACH; BROEDE, 2017). Esses aspectos subjetivos só são obtidos por meio da aplicação de questionários. Krüger, Drach e Broede (2017), em um estudo feito *in loco* na cidade do Rio de Janeiro, utilizaram o questionário padronizado da norma ISO 7730 de 2005, que apresenta perguntas sobre a escala perceptual e escala avaliativa conforme a norma ISO 10551 de 1995. Seus resultados expõem que em áreas tropicais e úmidas, como o Rio de Janeiro, a percepção do estresse térmico é mais exacerbada por uma maior abertura para o céu, onde se tem um maior nível de radiação direta, o que corrobora a necessidade de sombreamento dos usuários de espaços abertos em áreas tropicais. Na situação de verão do Rio de Janeiro, os usuários de áreas urbanas voltadas ao pedestre não sombreadas e mais abertas, sob condições extremas de estresse térmico, terão que lidar com respostas fisiológicas e sua própria tolerância reduzida aos aspectos relacionados ao contexto de tais áreas, o que agravará ainda mais seu desconforto térmico. Os autores ainda afirmam que esses dois fatores enfatizam a importância de promover estratégias de desenho urbano, que visem tanto os parâmetros físicos quanto as expectativas térmicas dos potenciais usuários de espaços exteriores.

#### **2.4.1 Temperatura do ar**

A temperatura do ar é a temperatura do ar ao redor do corpo humano (ISO 7726, 1998). É determinada por diversas fontes e dissipadores de calor. Determinada geralmente por medições de variáveis que são funções de volumes de líquidos, resistências elétricas, força eletromotriz, etc. Qualquer que seja a variável com a qual está sendo relacionada à temperatura, a leitura do sensor corresponde somente à temperatura onde ele se encontra (NBR 16401-2, 2008).

Por estudos de Javadi (2021), a percepção térmica no espaço verde resulta da interação de diferentes parâmetros, considerando a temperatura do ar, tipo de contexto e cobertura, o grau de abertura ou sombreamento do espaço, o nível de adaptação das pessoas ao espaço verde, bem como o comportamento e os tipos de atividade das pessoas. Resultando em uma percepção da temperatura pelas pessoas sendo o resultado de condições fisiológicas, variáveis climáticas,

incluindo temperatura do ar, recepção direta ou indireta da radiação solar, velocidade do vento e umidade, e da interação desses componentes com cada um deles.

#### 2.4.2 Temperatura radiante média

Uma questão crítica ao estender a avaliação do conforto humano de ambientes internos para externos é a necessidade de medição da temperatura radiante média  $T_{mrt}$ . É o valor que soma todos os fluxos de radiação de ondas curtas e longas absorvidos por um corpo humano e que afetam seu equilíbrio energético.  $T_{mrt}$  é a variável chave na avaliação da sensação térmica ao ar livre durante o dia no verão, independentemente do índice de conforto usado (ALI-TOUDERT; MAYER, 2006). Apontado também por Matzarakis, Rutz e Mayer (2006) como o parâmetro meteorológico mais importante que afeta o balanço de energia humana durante condições de tempo ensolarado, este ganho de energia geralmente varia consideravelmente em condições de espaço aberto.

O cálculo das temperaturas radiantes médias para aplicações biometeorológicas é frequentemente complexo e existem vários procedimentos para determinar  $T_{mrt}$  para configurações internas ou externas (BRÖDE et al., 2012). A equação (1) é apresentada pela ISO 7726 (1998) no Anexo B, que usa a velocidade do vento, a temperatura radiante média e a temperatura de globo (CHEN; LIN; MATZARAKIS, 2014):

$$T_{mrt} = \left[ (T_g + 273.15)^4 + \frac{0,25 * 10^8}{\epsilon_g} * \left( \frac{|T_g - T_a|}{D} \right)^{1/4} * (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273.15 \quad (1)$$

Onde:

$T_{mrt}$  = Temperatura radiante média (°C)

$T_g$  = Temperatura do globo (°C)

$V_a$  = Velocidade do ar (m/s)

$T_a$  = Temperatura do ar (°C)

$\epsilon_g$  = Emissividade do globo

$D$  = Diâmetro do globo (m)

A temperatura radiante média é o parâmetro mais afetado pelo sombreamento de árvores e edifícios. A redução deste parâmetro através do sombreamento inclui menos radiação direta, difusa e refletida de ondas curtas do sol e menores temperaturas de superfície e, portanto,

menor radiação térmica (ondas longas) de superfícies urbanas (DUARTE et al., 2015) e mostra a soma de todos os fluxos de radiação de ondas curtas e longas absorvidos pelo corpo humano (WANG; AKBARI, 2016).

Shinzato e Duarte (2018) afirmam que a temperatura radiante média é, dentre todas as variáveis medidas e simuladas em seu estudo na cidade de São Paulo, a mais impactada sob o dossel da vegetação arbórea, o que influencia diretamente o conforto térmico, além da influência da umidade do ar. Sendo afetada principalmente pelas características do dossel e do solo, e o efeito do sombreamento depende não só do formato da copa, mas também da forma como as folhas estão agrupadas e distribuídas, representada pela densidade da área foliar das árvores. O sombreamento provocado pelas copas influencia diretamente as temperaturas superficiais logo abaixo do dossel, que por sua vez também vão afetar a temperatura radiante média.

### **2.4.3 Fluxo de ar – Ventos**

Conforme Javadi (2021), os fatores que afetam a velocidade do vento devem ser analisados enquanto se estuda o efeito da velocidade do vento no conforto térmico dentro do espaço verde. Como o vento não é um fenômeno específico do espaço verde e seus impactos vão além deles, precisamos saber como o vento se comporta na escala microclimática em que o espaço verde está localizado. Assim, a análise da velocidade do vento no espaço verde começa com a análise das camadas do fluxo de ar no ambiente urbano, como muitos outros espaços abertos urbanos, e então os efeitos de outras variáveis no conforto térmico devem ser avaliados enquanto o vento atua e, finalmente, as soluções adequadas para uma melhor interação com o vento nos espaços verdes devem ser fornecidas. É importante entender o comportamento das diferentes camadas de fluxo de ar, o vento é afetado pela geometria urbana e pelas variáveis climáticas.

A velocidade do ar é um parâmetro que deve ser levado em consideração quando se analisam as trocas de calor por convecção e evaporação. É um parâmetro com grandes dificuldades na medição devido às constantes flutuações em intensidade e direção no tempo e espaço. É importante notar que em estudos de conforto térmico as flutuações da velocidade do ar têm bastante efeito na sensação subjetiva da corrente de ar (NBR 16401-2, 2008). De maneira geral, pode-se afirmar que a forma mais adequada de avaliar a força mecânica do vento ou de prever as condições de conforto do vento das pessoas no espaço verde urbano é a utilização de

limites de velocidade do vento. Esses limites podem ser definidos para determinados tipos de atividades ou locais específicos, usando repetição irregular ou aumento da velocidade do vento em um determinado período de tempo (JAVADI, 2021).

Conforme Feitosa et al. (2021), a velocidade do vento e a turbulência atmosférica definem o coeficiente de transferência de calor entre a superfície e a atmosfera e determinam o fluxo de calor sensível. Velocidades mais altas do vento aumentam o fluxo de calor sensível e a evapotranspiração de superfícies vegetadas, como os telhados verdes, estando altamente correlacionada com a temperatura dessas superfícies. Além da temperatura, o efeito do resfriamento do vento é significativo no alívio do estresse térmico devido ao processo de transferência de calor por convecção.

A morfologia urbana está ligada ao direcionamento dos ventos, muitas vezes podendo prejudicar a permeabilidade do ar, conforme é retratado por Barbosa, Drach e Corbella (2019), em um estudo feito no bairro de Copacabana, no Rio de Janeiro, onde são notadas mudanças na permeabilidade do ar e na velocidades de vento, conforme o adensamento é alterado, interferindo diretamente no microclima local.

O vento contribui para o estresse térmico por calor se as temperaturas do ar excederem cerca de 35 °C, que está próximo do valor característico da temperatura média da pele. Por outro lado, o estresse por frio em baixas temperaturas é consideravelmente aumentado por altas velocidades do vento (BRÖDE et al., 2012). Com base nos estudos de Penwarden (1973) sobre a força mecânica do vento, conclui que a velocidade média do vento de cerca de 5 m/s é o limite inicial de condições desconfortáveis, enquanto a velocidade do vento de 15 m/s é totalmente desagradável e a velocidade do vento de 20 m/s é considerada perigosa. Esses valores são aproximados, uma vez que devem ser combinados com outros fatores bioclimáticos como por exemplo temperatura e umidade do ar para se estimar o nível de conforto térmico.

#### **2.4.4 Temperatura do solo**

A temperatura do solo é fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois afeta os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo (GUPTA; LARSON; ALLMARAS, 1984). Conforme Frota e Schiffer (2001) o revestimento do solo interferirá nas condições climáticas locais, pois quanto maior for a umidade do solo, maior será a sua condutibilidade térmica. Um solo pouco úmido se esquentará mais depressa durante o dia, mas à noite devolverá o calor armazenado rapidamente, provocando uma grande amplitude

térmica diária. Este fato é bastante significativo nas modificações climáticas sentidas a nível urbano, uma vez que os materiais de revestimento do solo, não só nos calçamentos das ruas, mas a nível das edificações, alteram sobremaneira as condições de porosidade e, conseqüentemente, de drenagem do solo, acarretando alterações na umidade e pluviosidade locais. A temperatura se mostra com menor amplitude térmica conforme a profundidade aumenta, sendo que a maior variação de temperatura do solo ocorre em sua superfície.

A temperatura do solo tem influência com a quantidade de radiação solar que recebe. Shashua-Bar, Pearlmutter e Erell (2009) apresentam em seu estudo que há diferenças entre o tipo de sombreamento, sendo que a introdução de grama sob os elementos para sombreamento reduz ainda mais a temperatura do solo, contribuindo ainda mais para o conforto humano, indicando o uso de árvores como uma forma eficiente para se reduzir a temperatura do ar externo.

As temperaturas superficiais do solo também são afetadas conforme o tipo de cobertura. Ao analisar tipos de cobertura total do solo, o albedo das plantas do tipo suculentas não é significativamente diferente do albedo da grama e de outras não suculentas. Ao mesmo tempo, o albedo dessas superfícies "verdes" (na faixa de 0,20-0,26) é muito menor do que o de materiais de cobertura do solo urbano típicos, como pavimentação de concreto e solo descoberto (0,32-0,39) (SNIR; PEARLMUTTER; ERELL, 2016). Bonan (2000) afirma que a grama reduz as temperaturas principalmente por meio da evapotranspiração ao nível do solo, em gramados urbanos. No entanto, Pearlmutter, Berliner e Shaviv (2006) afirmam que a contribuição final dos gramados para o conforto térmico pode de fato ser limitada, uma vez que não afeta a radiação de entrada direta, que tem um impacto dominante sobre o estresse térmico diurno em espaços urbanos quentes e secos.

Segundo Payero, Neale e Wright (2005) o fluxo de calor do solo representa a quantidade de energia radiante absorvida ou liberada na superfície do solo durante um determinado período de tempo. É um componente importante do balanço de energia do solo e é comumente incluído em modelos para calcular a evaporação do solo e a evapotranspiração de diferentes tipos de vegetação, influenciando o balanço energético do ambiente e a percepção humana do clima.

### 2.4.5 Umidade atmosférica

A umidade atmosférica pode ser expressa em valores de umidade específica, relativa ou absoluta do ar, sendo que a umidade relativa (RH) é a relação entre a umidade absoluta, os valores podem ser expressos em números absolutos ( $\text{g/m}^3$ ) e seu ponto de saturação, sendo apresentado em forma relativa (%). É um valor geral de referência para descrever o teor de umidade no ar, sendo expresso em diversas variáveis termodinâmicas, incluindo a pressão de vapor, temperatura de ponto de orvalho, e razão de umidade específica. No que se refere às trocas por evaporação entre a pessoa e o ambiente, a umidade específica do ar é o parâmetro que deve ser levado em consideração, e é frequentemente expressa sob a forma de pressão parcial de vapor de água. A pressão parcial de vapor de água de uma mistura de ar úmido é a pressão que o vapor d'água contido nesta mistura exerceria se ocupasse sozinho o volume ocupado pelo ar úmido, à mesma temperatura (NBR 16401-2, 2008). A umidade relativa do ar depende dos níveis de temperatura do ambiente. Para um determinado teor de umidade do ar há a relação de quanto menor a temperatura, maior a umidade relativa.

Segundo Feitosa e Wilkinson (2018), os níveis de umidade relativa desempenham um papel importante no estresse térmico por calor, pois regulam a taxa de evaporação do suor da pele que permite ao corpo humano se resfriar em dias quentes, atuando diretamente na capacidade da pele em evaporar o suor. Assim, quanto maior a RH, menor a taxa de evaporação da pele e maior a temperatura aparente. Além das semelhanças entre temperatura aparente e temperatura do ar para baixos níveis de RH, é importante destacar que a baixa umidade pode ser um problema, devido à rápida evaporação do suor. Nessas condições, há o risco de desidratação. Conforme Lamberts, Dutra e Pereira, (2014), nos locais com alta umidade, a transmissão de radiação solar é reduzida porque o vapor de água e as nuvens a absorvem e redistribuem na atmosfera, refletindo uma parte de volta ao espaço. Em locais com ar muito seco, os dias tendem a ser muito quentes e as noites frias; já em locais úmidos, as temperaturas extremas tendem a ser atenuadas. É importante compreender que em altas umidades relativas há uma maior dificuldade em evaporar o suor, aumentando a sensação de desconforto térmico. Wang et al. (2019) desenvolvem em seus estudos um comparativo entre cinco cenários, um caso base e quatro variações entre ausência de árvores, telhados verdes e arborização, registrando um aumento de 1,1 a 1,3% na umidade relativa do ar com a adição de elementos vegetados no meio urbano.

No entanto, Javadi (2021) indica que a umidade deve ser vista em conjunto com outras variáveis, como temperatura do ar, radiação solar, velocidade do ar e as interações dessas variáveis entre si. Uma vez que a razão de umidade relativa afeta a taxa de evaporação, a interação dessas duas variáveis deve ser considerada ao estudar o conforto térmico no espaço verde. Em climas quentes, por exemplo, o suor evapora da pele fazendo com que as pessoas se sintam frias, enquanto a própria taxa de evaporação é afetada pela umidade do ar. A alta umidade reduz a evaporação, por isso nos sentimos mais quentes em uma determinada temperatura quando a umidade do ar é alta. Em geral, quanto mais baixa for a umidade relativa, mais seco é o ar e mais rápida é a taxa de evaporação; e vice-versa, em umidade relativa mais alta o ar está mais próximo do nível de saturação e ocorre menos evaporação. Além da temperatura do ar que afeta a quantidade de umidade no ar, o fluxo de ar também pode afetar a umidade relativa e, conseqüentemente, a taxa de evaporação.

#### **2.4.6 Radiação solar**

É a principal fonte de energia para o planeta. Tanto como fonte de calor quanto como fonte de luz, o sol é um elemento de extrema importância no estudo voltado ao funcionamento das edificações (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Conforme Santamouris (2014), a intensidade da radiação solar determina em grande parte o armazenamento de calor e a temperatura da superfície dos telhados, bem como a quantidade de calor transmitida ao edifício e a evaporação. As características espectrais da radiação solar incidente também são importantes em coberturas verdes, onde a cor, a umidade e a estrutura das camadas variam a transmitância, refletância e absorção nos materiais em função do comprimento de onda.

A radiação solar é composta por ondas curtas e longas, que afetam diretamente a temperatura do ar e conseqüentemente o conforto térmico. A radiação de comprimento de onda curto afeta diretamente o conforto térmico das pessoas no espaço verde por meio da emissão direta do sol e do reflexo direto dos elementos ambientais. Além disso, a radiação de ondas longas dos elementos ambientais, que é o resultado da absorção da radiação solar, afeta as condições de conforto térmico ao alterar o processo de transferência de calor com o ambiente circundante (JAVADI, 2021).

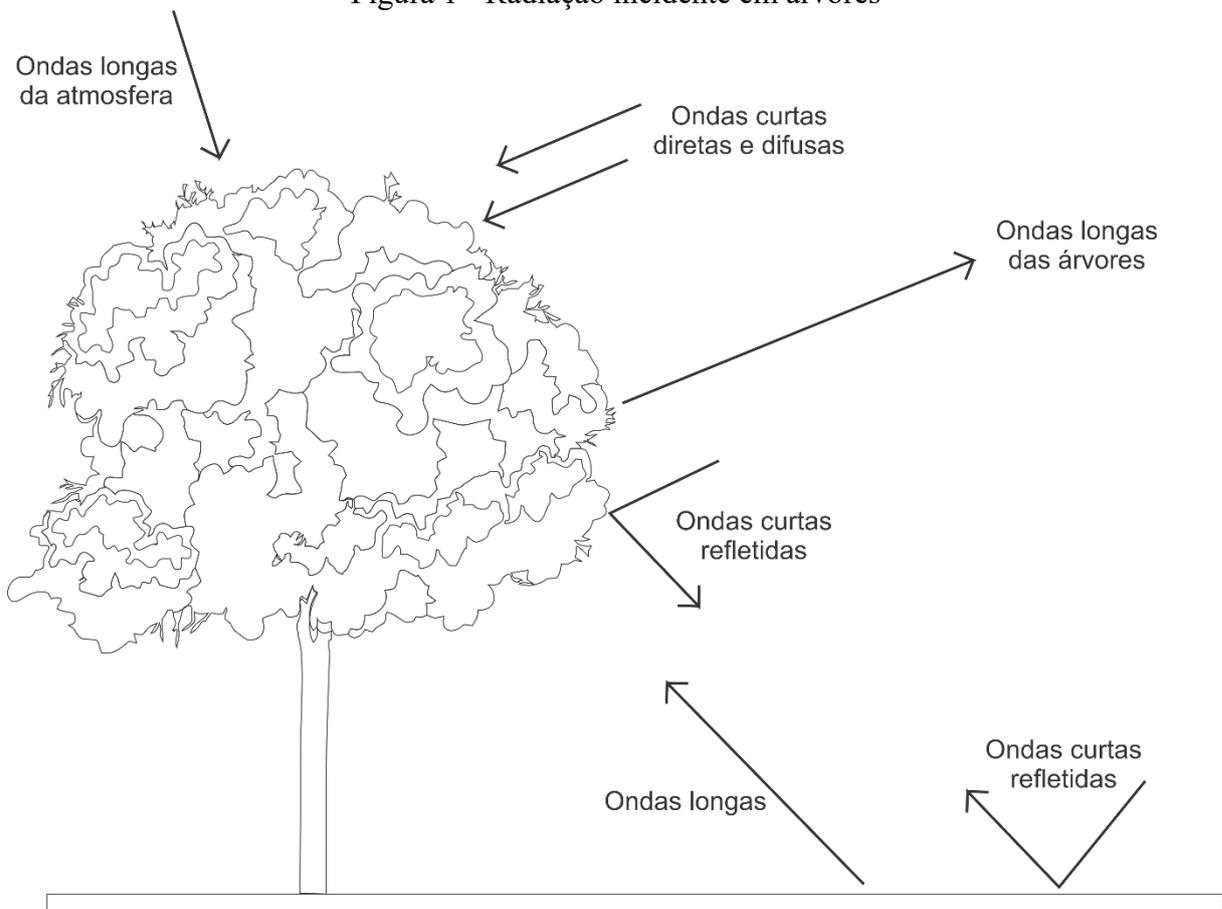
No que diz respeito ao uso da arborização urbana, Oke (1989) afirma que as árvores interceptam não apenas a radiação solar direta, mas também refletem a radiação de ondas longas de seus arredores, a radiação de ondas longas do solo, superfícies de edifícios e o céu e em

alguns casos há uma troca significativa de calor sensível entre o ar urbano quente e as folhas mais frias. A dissipação dessa carga de calor pelo resfriamento da transpiração depende do balanço hídrico, do clima do vento e das espécies arbóreas.

Em um estudo experimental conduzido por Shashua-bar, Pearlmutter e Erell (2009) em um ambiente quente e árido no sul de Israel, foi comparada a diferença entre dois ambientes com diferentes tipos de sombreamento, em dois edifícios com um pátio central, o primeiro ambiente deles foi sombreado com árvores e o solo revestido com grama e o segundo ambiente foi sombreado com uma malha de sombreamento e o solo parte descoberto e parte pavimentado. Em seus resultados apontaram que a combinação de árvores de sombra sobre grama foi previsivelmente considerada a estratégia de paisagem mais eficaz em termos de resfriamento fornecido, com a temperatura máxima do ar reduzida em até 2 °C, um tanto inesperadamente, a malha de sombra, não totalmente opaca, fornecendo a mesma quantidade de sombra que as árvores não resfriou o ar nos locais estudados, mas causou um pequeno efeito de aquecimento relativo, até 0,9 °C. Concluíram também que tanto as árvores quanto as malhas têm potencial para melhorar o conforto térmico ao ar livre em áreas onde oferecem sombra, bloqueando a radiação solar direta no ambiente, conforme indicado pelo fato de que em ambos os casos a temperatura da superfície do solo sombreado foi reduzida substancialmente. A introdução de grama sob as árvores ou sob a malha reduz ainda mais a temperatura do solo, contribuindo ainda mais para o conforto humano.

Javadi (2021) elenca quatro fatores importantes que afetam a radiação solar em espaços verdes que podem ser apontados: fator de visualização do céu; fator de vista das diferentes superfícies sólidas, devido ao ajuste da radiação de onda curta refletida; albedo, porque afeta a radiação de ondas curtas de entrada; e emissividade das diferentes superfícies que influenciam a temperatura da superfície. A Figura 1 esquematiza o efeito das árvores e vegetação e diferentes materiais contra a radiação solar.

Figura 1 - Radiação incidente em árvores



Fonte: Adaptado de (JAVADI, 2021)

#### 2.4.7 Refletância das superfícies e Albedo

A refletância de uma superfície é a razão entre a quantidade de radiação não absorvida e a quantidade de radiação que atinge essa superfície. Já o albedo é a porcentagem de energia solar que atinge uma superfície que é refletida. Albedo é uma medida de energia e a refletância de superfície é uma propriedade de um material. Taha (1997) define albedo de uma superfície como sua refletividade integrada hemisférica e de comprimento de onda. Esta definição se aplica tanto a superfícies uniformes simples quanto a superfícies heterogêneas e complexas. Normalmente, os albedos urbanos estão na faixa de 0,10 a 0,20, mas em algumas cidades esses valores podem ser excedidos, as cidades do norte da África são bons exemplos de áreas urbanizadas de alto albedo, chegam a valores de 0,30 a 0,45, enquanto a maioria dos EUA e as cidades europeias têm albedos mais baixos, entre 0,15 a 0,20.

O uso de materiais de alto albedo reduz a quantidade de radiação solar absorvida pelos envoltórios de edifícios e estruturas urbanas e mantém suas superfícies mais frias. Os números médios para o albedo para ambiente com vegetação, estão em torno de 0,20 - 0,25 (DIMOUDI; NIKOLOPOULOU, 2003). No entanto, superfícies com alto albedo aumentam a reflexão da radiação solar, aumentando a incidência de ondas longas.

Superfícies urbanas que têm suas superfícies em áreas de concreto ou asfalto tem uma temperatura maior substancialmente na superfície. Isso é reflexo da baixa refletância da radiação solar que depende do albedo da superfície. Albedos mais altos, como ocorre em superfícies vegetadas, proporcionam melhores condições térmicas, pois reduz os fluxos de calor por convecção de superfícies mais frias (FEITOSA et al., 2021). Os resultados de simulações meteorológicas exibidos por Taha (1997) sugerem que as cidades podem reverter as ilhas de calor de forma viável e compensar seus impactos no uso de energia, simplesmente aumentando o albedo de materiais de cobertura e pavimentação e reflorestando áreas urbanas. O aumento da vegetação nas áreas urbanas pode resultar em uma diminuição de cerca de 2 °C na temperatura do ar. Em algumas circunstâncias, por exemplo, sistemas de solo-vegetação com potencial evaporação e condições meteorológicas favoráveis, a diminuição localizada na temperatura do ar pode chegar a 4 °C.

#### **2.4.8 Evapotranspiração e Índice de área foliar**

A evapotranspiração é um processo de troca de energias que ocorre com a junção do processo de evaporação e transpiração das plantas. Seus principais parâmetros climatológicos de avaliação são: a radiação solar, a velocidade do vento, a temperatura do ar, a umidade relativa e as condições do céu. Além disso, a evapotranspiração também depende de características da vegetação e do solo, principalmente do grau de sombreamento do dossel e da quantidade de água disponível na superfície do solo. Sendo o índice de área foliar (IAF) um dos mais importantes fatores para o processo de evapotranspiração (CASCONI et al., 2019). A evapotranspiração dos sistemas solo-vegetação é um moderador eficaz dos climas próximos à superfície, particularmente nas latitudes médias e baixas quentes e secas. Dadas as condições certas, pode criar "oásis" nos cenários urbanos, segundo Taha (1997). A evapotranspiração na superfície das plantas envolve três processos específicos, (a) a evaporação da água dentro das folhas, (b) a difusão do vapor para a superfície das folhas e (c) o transporte do vapor da superfície das folhas para o ar. O fluxo de energia relacionado à evaporação da água das folhas

depende principalmente da pressão de vapor na superfície da folha, da pressão de vapor correspondente no dossel e da resistência interna à transferência de vapor no dossel (SANTAMOURIS, 2014). A evaporação da água do solo descoberto envolve fatores de solo complexos, bem como condições atmosféricas. Estudos de transpiração adicionam a essas outras características físicas e biológicas importantes, pois o sistema radicular de uma planta pode atrair a umidade em uma profundidade considerável do solo, suas partes aéreas permitem a transferência de vapor através de considerável espessura de ar, e seu mecanismo estomático fotossensível restringe essa transferência, em geral, às horas do dia (PENMAN, 1948).

As plantas têm características que influenciam nas taxas de evapotranspiração como Cascone et al. (2019) apresentam. Além do IAF, que regula a quantidade de incidência da radiação solar no solo, há também a resistência estomática das folhas, que varia de espécie para espécie e regula a perda de água através dos estômatos das plantas. Quanto menor a resistência estomática, maior será a evapotranspiração. Já a condutância estomática é a característica que é oposta a resistência estomática e é proporcional em relação à evapotranspiração. O modelo para avaliar o potencial de evapotranspiração mais conhecido é o Penman-Monteith, que permite estimar os fluxos de calor latente na camada de vegetação que atingem a evapotranspiração diária em um intervalo de tempo, levando em consideração diversos fenômenos físicos e algumas características das plantas (CASCONE et al., 2019).

A evapotranspiração aumenta o nível de umidade relativa do ar, podendo em climas úmidos, aumentar a percepção de clima abafado pelo usuário, que terá sua taxa de evaporação do suor reduzida. É importante entender como ela ocorre quando combinada com outros fatores como temperatura do ar e velocidade do vento. No entanto, Cascone et al. (2019) acrescentam que mesmo que a energia fornecida pela radiação solar seja a principal força motriz para a vaporização da água, a diferença entre a pressão do vapor d'água na superfície do solo e das plantas e o ar circundante são outros fatores importantes que também determinam a remoção do vapor no processo de evapotranspiração. Temperaturas altas junto à menor umidade relativa do ar geram um aumento na evapotranspiração das plantas (THEODOSIOU, 2003). Jim e Peng (2012), afirmam que geralmente, durante a noite o ar externo atinge baixas temperaturas que, inversamente, causam o aumento da umidade relativa em até 100%, reduzindo assim o processo de evapotranspiração. Ao contrário, durante o dia, a temperatura do ar mais elevada induz uma queda da umidade relativa, permitindo que o processo de evaporação ocorra. De acordo Jim e Tsang (2011), a evapotranspiração é minimizada em um ambiente úmido e a alta umidade relativa é o fator crucial que amortece a taxa de transpiração. Os efeitos do processo de

evapotranspiração são melhores aproveitados em climas mais áridos, não oferecendo grandes diferenças em termos de evapotranspiração em ambientes úmidos (LAZZARIN; CASTELLOTTI; BUSATO, 2005)

## 2.5 VARIÁVEIS HUMANAS

Krüger e Drach (2017), afirmam que muitas variáveis humanas não são facilmente controláveis como fatores individuais citando gênero, idade, índices de massa corporal e cor de pele. Outras, por sua vez, foram desenvolvidas em forma de equações para se aproximar às reações reais ao corpo humano. Fatores como peso, altura e idade também tem influência na sensação térmica sentida pelas pessoas.

### 2.5.1 Taxa Metabólica - *met*

Conforme ASHRAE (2017), taxa metabólica (*met*) é a taxa de transformação da energia química em calor e trabalho mecânico pelas atividades metabólicas de um indivíduo, por unidade de área de superfície da pele, é expressa em unidades de *met*, igual a 58,2 W/m<sup>2</sup>, que é a energia produzida por unidade de área de superfície da pele de uma pessoa média sentada em repouso. Os valores variam dependendo da atividade que o indivíduo está exercendo. Na Tabela 1 são apresentados valores padrões com relação a essa atividade.

Tabela 1 - Relação atividade x metabolismo

Atividade	Taxa metabólica	
	Unidade <i>met</i>	W/m <sup>2</sup>
<b>Descansando</b>		
Dormindo	0,7	40
Deitado	0,8	45
Sentado, quieto	1,0	60
De pé, relaxado	1,2	70
<b>Caminhando (em uma superfície plana)</b>		
0,9m/s; 3,2km/h;	2,0	115
1,2m/s; 4,3km/h;	2,6	150

1,8m/s; 6,8km/h;	3,8	220
<b>Atividades diversas de lazer</b>		
Dançando, social	2,4 – 4,4	140 – 255
Musculação	3,0 – 4,0	175 – 235
Tênis, individual	3,6	210 – 270
Basquetebol	5,0 – 7,6	290 – 440
Luta livre, competição	7,0 – 8,7	410 – 505

Fonte: Adaptado de NBR 16401-2

### 2.5.2 Roupas

Esse parâmetro pode ser definido por ASHRAE (2017) como *clo*, é uma unidade usada para expressar o isolamento térmico fornecido por artigos de vestuário e conjuntos de vestuário.  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ .

Lamberts, Dutra e Pereira (1997) apresentam uma tabela (Tabela 2) com os índices de *clo* mais utilizados, a NBR 16401-2 expõe uma tabela mais completa de variações de vestimentas.

Tabela 2 - Índices de *clo*

Vestimenta	$I_{clo}$
Meia calça	0,10
Meia fina	0,03
Meia grossa	0,05
Calcinha e sutiã	0,03
Cueca	0,03
Cuecão longo	0,10
Short	0,11
Bermuda	0,15
Camiseta de baixo	0,09
Camisa de baixo mangas compridas	0,12
Camisa mangas curtas	0,15
Camisa fina mangas compridas	0,20
Camisa flanela mangas compridas	0,30

Blusa com mangas compridas	0,15
Colete em tecido leve	0,15
Colete em tecido pesado	0,29
Suéter em tecido pesado	0,37
Saia grossa	0,25
Vestido leve	0,15
Vestido grosso mangas compridas	0,40
Jaqueta tecido leve	0,22
Jaqueta tecido pesado	0,49
Calça fina	0,20
Calça média	0,25
Calça flanela	0,28
Sandálias	0,02
Sapatos	0,04
Botas	0,08

---

Fonte: Adaptado de (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014)

## 2.6 ÍNDICES DE ANÁLISE DO ESTRESSE E CONFORTO TÉRMICO HUMANO

Segundo Johansson et al. (2014) o conforto térmico ao ar livre, em oposição ao conforto interno, é um campo de pesquisa relativamente novo. A atenção cada vez maior aos ambientes externos no início dos anos 2000 levou ao uso expedito de métodos, bem como de índices de conforto térmico desenvolvidos para ambientes internos. Isso parece ter causado alguns problemas, uma vez que o ambiente externo é muito mais complexo do que o ambiente interno. Por exemplo, as variações microclimáticas espaciais e temporais das variáveis meteorológicas costumam ser grandes. Outras razões para a dificuldade incluem a falta de controle do clima em espaços ao ar livre, a adaptação física e sociocultural do sujeito e a grande variação no uso e usuários no ambiente ao ar livre. Assim, uma análise interna não pode ser transferida diretamente para as condições externas sem antes ser ajustada.

O nível de conforto térmico humano ao ar livre é uma variável importante para se qualificar o microclima urbano. A avaliação do conforto térmico humano está em desenvolvimento desde o século XX, quando foram iniciados os primeiros modelos simplificados (COCCOLO et al., 2016). Em 1936 os princípios da termodinâmica foram

aplicados às trocas de energia entre o ambiente e o corpo humano (GAGGE, 1936). Essas linhas de pesquisa foram desenvolvidas mais tarde por Givoni, quando foi elaborado o ITS (Índice de Estresse Térmico) (GIVONI, 1963) e por Fanger em 1970, que desenvolveu o PMV (*Predicted Mean Vote*) (FANGER, 1970), usado amplamente para o cálculo de conforto humano interno. Coccolo et al. (2016) relatam que durante a década de 1980, foi possível o desenvolvimento de conhecimentos suficientes sobre a física da troca de calor e aliado ao uso de tecnologia, houve um aperfeiçoamento na pesquisa do ambiente térmico humano, e a formulação de índices baseados na troca de calor corporal. De acordo com Höppe (2002), o conforto interno das edificações, que já foi estudo nas décadas passadas, apresenta um ponto positivo para análise, onde o ambiente interno tem maior estabilidade em termos de temperatura, umidade, radiação e fluxo de ar, também sendo mais fácil controlá-las mecanicamente de acordo com a atividade humana. Por outro lado, é desafiador descrever quantitativamente o ambiente externo em termos de conforto humano, uma vez que é amplamente influenciado pela rápida variação do ambiente e pelo tempo de exposição, que influencia a capacidade humana de aclimação. É importante salientar que há mudanças no conforto externo em relação às atividades metabólicas, podendo o corpo se adaptar basicamente em três maneiras diferentes: adaptação física, adaptação fisiológica e adaptação psicológica (NIKOLOPOULOU; STEEMERS, 2003).

Dentro da vasta gama de índices, alguns se destacam no âmbito da pesquisa, mostrando entre si vantagens e desvantagens, dependendo do local de análise e do resultado almejado. O ITS (Índice de Estresse Térmico definido pela primeira vez por Givoni, em 1963, representa a razão entre a taxa de suor secretado por uma pessoa necessária para manter o equilíbrio térmico e a eficiência de resfriamento do corpo, de acordo com a velocidade do vento, umidade relativa e características do vestuário (GIVONI, 1963). No processo de análise, com o tempo, os pesquisadores foram adaptando esse índice, Pearlmutter, em 2007, o adaptou para ambientes externo e expresso em watts, posteriormente correlacionado com uma escala de sensação térmica de sete pontos, sendo que 0W representa a neutralidade térmica e as transições para pouco quente, quente e sensações de muito calor ocorrem em incrementos sucessivos de 320 W, (PEARLMUTTER; BERLINER; SHAVIV, 2007), mais tarde em 2011, juntamente com Errel e Williamson, foi reajustado (ERREL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011), no entanto, o ITS é um índice com bastante aplicação em estudos de climas áridos (COCCOLO et al., 2016).

O voto médio previsto (PMV), baseado no modelo de balanço de calor de Fanger, é definido como o voto de sensação térmica média de um grupo de pessoas (de -3 = frio a +3 =

quente) e está relacionado à porcentagem prevista de insatisfeitos (PPD) que descreve a quantidade de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico (COCCOLO et al., 2016). Foram desenvolvidos com intenção de serem aplicados em ambientes internos (FANGER, 1970). Liu et al. (2021) apontam que o PMV também é um índice frequente em pesquisas, uma vez que as variáveis meteorológicas de  $T_a$ ,  $RH$ ,  $V_a$  e  $T_{mrt}$  e fatores pessoais são considerados de forma abrangente e ao estender às roupas e fatores de atividade e fluxos de radiação (incluindo radiação de onda curta e longa), o índice PMV interno pode ser aplicado ao ambiente externo. Também foi um índice amplamente adotado em comparações de diferentes estudos e seus resultados numéricos denotam diretamente a sensação térmica humana e não precisam de categorias ou escalas. Mas como o valor do PMV é uma função matemática do clima local, na maioria das aplicações em ambientes externos ele pode atingir também valores acima ou abaixo dos valores  $[-4]$  -  $[+4]$ , embora estes estejam fora da escala dos dados experimentais originais de Fanger (ENVI-MET, 2021). Ainda que praticável para ambientes externos, softwares como o ENVI-met (2021), apesar de possibilitarem a aplicação, não sugerem o uso do índice PMV, em casos de estresse térmico por calor, já que pode resultar facilmente em valores muito acima de +4 (+8 e mais), ultrapassando a faixa do sistema PMV original.

A temperatura efetiva padrão, SET, é definida como a temperatura do ar equivalente de um ambiente isotérmico a 50% de umidade relativa em que um sujeito, ao usar roupas padronizadas para a atividade em questão, tem o mesmo estresse térmico e tensão termorregulatória como no ambiente real. SET usa a temperatura da pele e umidade da pele como condições limitantes, seus valores são derivados de um modelo de dois nós de fisiologia humana (GAGGE; FOBELETS; BERGLUND, 1986). Para uso em ambientes externos, adaptado por Pickup e Dear (2000) para Temperatura efetiva externa (OUT\_SET) ( Pickup e de Dear, 1999) corresponde à adaptação externa da Temperatura Efetiva Padrão (SET) pela adição da Temperatura Radiante Média.

Segundo Coccolo et al. (2016) o índice de clima térmico universal (UTCI) foi desenvolvido desde 1999 por um grupo de especialistas multidisciplinares (termofisiologia, medicina ocupacional, física, meteorologia, ciências biometeorológicas e ambientais), desenhado pela Sociedade Internacional de Biometeorologia e posteriormente pela Ação COST 730 (Cooperação em Ciência e Desenvolvimento Técnico). UTCI é definido como a temperatura do ar de referência (temperatura do ar igual a temperatura média radiante, velocidade do vento =  $0,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a 10m, umidade relativa = 50% até uma pressão de vapor de água constante de 20 hPa e taxa metabólica =  $135\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) que provocam a mesma tensão

térmica como a condição real; uma escala térmica de 10 pontos expressa a percepção térmica de +46 °C (estresse por calor extremo) a -40 °C (estresse por frio extremo); a sensação neutra está entre 9 °C a 26 °C (BŁAZEJCZYK et al., 2010).

É um modelo internacional capaz de quantificar o conforto humano ao ar livre para todos os climas; de acordo com o modelo da roupa de aclimatação, o isolamento da roupa varia em função do clima e é o único modelo aplicado a todos os climas, inclusive os polares, e a todas as escalas, do micro ao macro (COCCOLO et al., 2016). Javadi (2021) evidencia que o índice UTCI é desenvolvido com base em um conceito de temperatura equivalente, cujo conceito inclui definir um ambiente de referência e integrá-lo a um modelo de roupa adaptável. Está em consonância com os comportamentos da população urbana em se adaptarem às reais temperaturas ambientais utilizando o vestuário como isolante e a sua distribuição nas diferentes partes do corpo, bem como na redução da resistência térmica e evaporativa do vestuário provocada pelo vento e movimento do utilizador. Staiger, Laschewski e Matzarakis, (2019) apontam o UTCI, como um índice mais recente, se mostrando amplo uso em muitas pesquisas e aplicações práticas relacionadas ao ambiente térmico humano devido à sua base de modelo mais diferenciada e à abordagem completamente nova de um modelo de conjunto de roupas. Uma diferença entre os outros níveis é apontada por Matzarakis (2021) em que, entre os principais índices, o UTCI usa como dado de entrada a velocidade do vento de 10m de altura, enquanto índices como PET, PT e SET adotam 1,1m de altura.

Índices como Temperatura de Percepção Equivalente (TEP) (MONTEIRO; ALUCCI, 2009), indicados para climas tropicais e Temperatura Percebida (PT) (STAIGER; LASCHEWSKI; GRÄTZ, 2011), uma versão parametrizada do modelo ASHRAE de dois nós (STAIGER; LASCHEWSKI; MATZARAKIS, 2019), também aparecem em comparações feitas em busca de um índice a ser utilizado com maior aplicabilidade.

Dentro da vasta gama de índices para avaliar o conforto humano, buscando uma forma de confrontar seus indicadores, Staiger Laschewski e Matzarakis (2019) expõem em uma comparação de doze entre 165 índices de percepção térmica humana e apontam quatro como apropriados para uso externo, entre eles Índice de Clima Térmico Universal (UTCI), Temperatura Percebida (PT), Temperatura Fisiologicamente Equivalente (PET) e Temperatura Efetiva Padrão Racional (SET), se mostrando métodos apropriados para uma ampla gama de diferentes aplicações biometeorológicas humanas para avaliar os impactos de curto prazo do tempo e o desenvolvimento de longo prazo do clima, tais como aplicações em epidemiologia e pesquisa em saúde, previsões biometeorológicas, vários aspectos de áreas de turismo e

recreação, avaliações de características regionais e locais do bioclimático, mapeamento bioclimático, bioclima urbano, design de espaços abertos e pesquisa nos impactos das mudanças climáticas.

O índice PET (*Physiological Equivalent Temperature*), baseado nos modelos de MENI (*Munich Energy- Balance Model for Individuals*) é definido como a temperatura fisiológica equivalente em qualquer lugar, ao ar livre ou dentro de casa. É equivalente à temperatura do ar na qual, em um ambiente interno típico, o equilíbrio térmico do corpo humano (com o metabolismo de trabalho de 80W, adicionado ao metabolismo básico e a resistência ao calor da roupa de 0,9 clo) é mantido com as temperaturas central e da pele iguais às das condições avaliadas (HÖPPE, 1999). A Equação (2) de equilíbrio do corpo humano se define como:

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0 \quad (2)$$

Onde:

$M$  = Atividade metabólica (W)

$W$  = Produção de trabalho físico (W)

$R$  = radiação líquida do corpo (W)

$C$  = fluxo de calor convectivo (W)

$E_D$  = Fluxo de calor latente para evaporar a água em vapor de água que se difunde através da pele (W)

$E_{Re}$  = Soma dos fluxos de calor para aquecer e umidificar o ar inspirado (W)

$E_{Sw}$  = Fluxo de calor devido à evaporação do suor

$S$  = Fluxos de calor de armazenamento para aquecer ou resfriar a massa corporal (W)

Todos os valores são expressos em Watt (W) e as perdas de calor têm sinal negativo. A radiação líquida, também denominada de energia radiante, é o saldo de radiação sobre a superfície de um corpo, o qual representa a principal fonte de energia dos processos naturais, como por exemplo, a perda de água por superfície. Segundo Snir, Pearlmutter e Erell (2016) a radiação líquida de todas as ondas  $R_n$  é calculada em watts por metro quadrado de superfície corporal com a equação (3):

$$R_n = (K_{dir} + K_{dif} + K_h + K_v) \cdot (1 - \alpha_s) + L_d + L_h + L_v + L_s \quad (3)$$

Onde:

$K$  = Radiação de ondas curtas

$L$  = Radiação de ondas longas

$K_{dir}$  = Radiação direta

$K_{dif}$  = Radiação difusa

$K_h$  = Radiação refletida do solo horizontal

$K_v$  = Radiação refletida em superfícies verticais (se houver)

$\alpha_s$  = Absorção solar

$L_d$  = Radiação de ondas longas que irradia para baixo

$L_h$  = Radiação de ondas longas que irradia em superfícies de solo horizontais (se houver)

$L_v$  = Radiação de ondas longas que irradia em superfícies verticais (se houver)

$L_s$  = Radiação de ondas longas que é emitida pelo organismo para o meio ambiente

A radiação de ondas curtas, parte da radiação solar, incidente no corpo inclui radiação direta ( $K_{dir}$ ), difusa ( $K_{dif}$ ) e refletida do solo horizontal ( $K_h$ ) e, se presente, superfícies verticais ( $K_v$ ), e sua absorção é modificado pelo albedo da pele e vestimenta do próprio corpo ( $\alpha_s$ ). A radiação de ondas longas é absorvida da atmosfera que irradia para baixo ( $L_d$ ), superfícies de solo horizontais ( $L_h$ ) e (se houver) superfícies verticais ( $L_v$ ), e também é emitida pelo organismo para o meio ambiente ( $L_s$ ).

Coccolo et al. (2016) considera que é importante saber que a escala térmica do PET pode variar de acordo com o clima, se a escala ainda não for definida, as simulações podem ser validadas com monitoramento in loco e questionários. As aplicações PET se concentram em avaliações térmicas em avaliações bioclimáticas, como planejamento e mapeamento urbano e regional, em pesquisas sobre mudanças climáticas e outras aplicações científicas importantes (STAIGER; LASCHEWSKI; MATZARAKIS, 2019). Apontado também por Hirashima et al. (2018), o índice PET calibrado pode ser utilizado como um critério objetivo para avaliação das condições de conforto térmico em espaços urbanos abertos e pode ser introduzido em modelos de simulação de microclima de ambientes urbanos, fornecendo capacidade preditiva para estudos de planejamento e desenho urbano, além de permitir a análise de diversas soluções antes da decisão final. Da mesma forma, as novas condições microclimáticas locais decorrentes de intervenções em recintos urbanos podem ser avaliadas previamente.

## 2.7 ANÁLISE DO MICROCLIMA URBANO

Há três principais modos de análise do microclima urbano. O sensoriamento remoto, o qual é feito por meio de satélites; medições em campo, através de equipamentos que podem ser acompanhados de questionários; e simulação computacional.

### 2.7.1 Tipos de Softwares

Segundo LIU et al. (2021), tradicionalmente as avaliações do clima urbano são obtidas por intermédio de abordagens de monitoramento de campo com instrumentos meteorológicos. Nas últimas décadas, com o avanço da tecnologia, a simulação computacional tornou-se gradualmente a principal forma de abordagem. Os principais softwares são baseados ou em tecnologia de modelos de balanço de energia (EBM), como RayMan, SOLWEIG, green-CTTC, TEB-Veg ou tecnologia de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), que inclui softwares como OpenFOAM, FLUENT, STAR-CCM+, PHOENICS e ENVI-met. LIU et al. (2021) ainda apontam que os modelos baseados em CFD possuem duas vantagens sobre os modelos em EBM. A primeira é a capacidade explícita de simulação de acoplamento e a segunda é a alta resolução na simulação. Entre os softwares que trabalham com CFD o tratamento das tecnologias verdes e azuis é abordado de formas diferentes. Para a descrição da vegetação, PHOENICS e FLUENT usam o chamado modelo de dossel ideal, que representa apenas uma árvore por sua altura da copa, altura do tronco e geometria básica do dossel da planta, como esférico, oval e cônico. Já o OpenFOAM, o módulo FOLIAGE da PHOENICS e o módulo *Simple Plants* do ENVI-met utilizam o método estatístico, associando o IAF à morfologia da planta. O módulo ENVI-met *3D-Plant* usa o método geometria, discretizando a copa da árvore por geração de malha e definindo a forma específica de cada planta e sua posição espacial.

Para o cálculo da planta, as vegetações são consideradas meios porosos por seus efeitos aerodinâmicos na maioria dos modelos baseados em CFD, incluindo PHOENICS, FLUENT, OpenFOAM, STAR-CCM+ e ENVI-met. Para efeitos de radiação, as copas das árvores são tratadas como materiais semitransparentes com diferentes transmitâncias de luz devido à sua geometria estrutural e configurações de densidade de copa em alguns modelos baseados em CFD, como OpenFOAM, FLUENT e ENVI-met.

#### 2.7.1.1 ENVI-met

O software ENVI-met, se destacando como um modelo tridimensional, foi idealizado por Michael Bruse, em 1994 (ENVI-MET - DECODE URBAN NATURE WITH ENVI-MET SOFTWARE, 2021) e apresentado em 1998 (BRUSE; FLEER, 1998), se mostra uma ferramenta de simulação com potencial, englobando variáveis importantes para avaliar esse processo de estresse térmico. Além disso, é exposto como um dos programas mais utilizados

para esse tipo de análise das condições de conforto térmico do microclima urbano. Suas principais aplicações para esse trabalho se baseiam nos resultados das simulações envolvendo os elementos vegetados e elementos de sombreamento. O ENVI-met também é capaz de incluir corpos d'água em suas simulações, se tornando um dos principais softwares para pesquisadores que estudam as tecnologias urbanas verdes e azuis<sup>1</sup> (LIU et al., 2021). Com base nos princípios da mecânica dos fluidos, termodinâmica e leis da física atmosférica, o ENVI-met pode simular as interações superfície-planta-ar em um ambiente urbano. Uma de suas características é o modelo detalhado da vegetação, no qual as plantas não são apenas simbolizadas como um meio poroso para a insolação solar e o fluxo do vento, mas podem realmente interagir com o ambiente circundante por evapotranspiração. Com uma alta resolução espacial, os processos fisiológicos da vegetação podem ser avaliados e a vegetação pode ser representada de uma maneira muito detalhada, permitindo múltiplas comparações de cenários que de outra forma seriam impossíveis no mundo real. As pesquisas realizadas com o ENVI-met nos últimos anos seguem o mesmo fluxo de trabalho que se baseia em três etapas: modelagem, validação e a simulação do cenário analisado (LIU et al., 2021).

O processo de simulação combina interações entre variáveis climáticas e morfologia urbana e integra quatro sistemas principais - solo, vegetação, atmosfera e construção - cujas informações são inseridas como arquivos de entrada. As equações básicas do modelo físico estão relacionadas ao fluxo de ar médio; temperatura e umidade do ar; temperatura do solo; processos de turbulência e mudanças térmicas; e fluxo radioativo. O modelo atmosférico calcula o movimento do ar, turbulência tridimensional, temperatura do ar e umidade relativa, levando em consideração obstáculos como edifícios e vegetação. O modelo de superfície calcula as ondas de comprimento de onda longa emitidas e a radiação de onda curta refletida de diferentes superfícies usando os valores de temperatura de superfície definidos e calculados no processo de simulação (BARBOSA; DRACH; CORBELLA, 2019).

A cada nova versão o ENVI-met apresenta avanços, na versão 3 do software, as plantas eram modeladas como colunas de vegetação e eram incapazes de caracterizar a forma da árvore. A versão 4, lançada em 2014, permitiu a modelagem de vegetação de duas maneiras: *Simple plants* e *3D-plants*. O primeiro é semelhante aos modelos de vegetação que era apresentado na versão anterior do software, e o último tem a capacidade de digitalizar a copa e a raiz de árvores complexas por grupos de células com uma densidade de área foliar (LAD) e densidade de área

---

<sup>1</sup> Tecnologias verdes e azuis incluem árvores, telhados verdes, áreas verdes verticais e corpos d'água no meio urbano (LIU et al., 2021).

de raiz (RAD). Com essa nova função, o modelo planta-como-objeto, permite agregar todos os processos de cálculo das árvores como um todo, tornando a planta 3D um organismo completo (SIMON, 2016). O modelo ENVI-met, em vez de usar os valores de LAI (Índice de Área Foliar), considera o parâmetro de LAD para calcular a fisiologia das plantas. De acordo com o banco de dados de plantas ENVI-met, existem variações de tipos de vegetação, que possuem características específicas de acordo com os seguintes aspectos: fixação de CO<sub>2</sub> (plantas C3 ou C4), resistência estomática mínima, albedo de ondas curtas, altura da planta, profundidade total da raiz, densidade de área radicular e densidade de área foliar (SHINZATO; DUARTE, 2012). LAD é um parâmetro definido como a área foliar unilateral total (m<sup>2</sup>) por unidade de volume da camada (m<sup>3</sup>) em cada camada horizontal da copa da árvore. O modelo considera que o LAI é conhecido e o LAD pode ser calculado integrando os valores do LAI. Além disso, na versão 5, um novo método, *Lindenmayer-System*, foi implementado no ENVI-met para representar plantas mais realistas com agrupamentos de folhas detalhados, sistemas de ramificação e cálculos biomecânicos de plantas, introduzindo o sistema de cálculo baseado em fractal e uma modelagem precisa de transferência de calor no dossel (SIMON; SINSEL; BRUSE, 2020). Shinzato e Duarte (2012) ainda afirmam que a diferença média entre as temperaturas do ar no interior das áreas verdes e nas ruas circundantes varia de acordo com os valores do LAI. O efeito da sombra das copas das árvores também tem um grande potencial para melhorar o microclima e mitigar o estresse por calor em um clima quente e úmido, mas a eficiência da sombra microclimática das árvores dependerá do tipo de planta e principalmente da densidade foliar.

Há uma melhora contínua no desenvolvimento do software, de acordo com Simon, Sinsel, Bruse (2020) e Liu et al. (2021), a relação da análise com o telhado e a fachada verde na versão 4.4 também obteve uma melhora. A versão anterior não tinha um módulo de esverdeamento vertical dedicado. Os pesquisadores só puderam anexar plantas simples na grade antes da parede para emular indiretamente o sombreamento e a emissão reduzida de radiação de ondas longas. Já o novo módulo de telhado e fachada verde da versão 4.4 pode combinar o edifício, o esverdeamento e o substrato e considerar as trocas de calor e vapor dentro e entre as camadas de vegetação e substrato. A vegetação detalhada e o tipo de substrato do telhado e fachada verde podem ser editados na seção *Greening* do gerenciador de banco de dados. Os principais parâmetros de entrada incluem LAD, dimensão da planta e distribuição do ângulo da folha. As propriedades do substrato incluem emissividade, albedo, coeficiente de água do substrato para plantas, largura do espaço de ar entre o substrato e a parede.

Ainda assim, pesquisadores como Liu, Zheng e Zhao (2018) apontam com seus estudos aplicados para primavera e verão em Guangzhou, na China, classificado com Cfa por Köppen, que em zonas de clima subtropical quente-úmido que os resultados obtidos com a versão 4.2, ainda apresentava discrepâncias entre os parâmetros entre os parâmetros microclima modelados e observados, os considerando aceitáveis. Porém, para os parâmetros fisiológicos, o ENVI-met tendeu a superestimar a temperatura da superfície foliar e subestimar o fluxo de vapor, principalmente ao meio-dia do verão. Os autores ainda indicam que o cálculo simplificado do modelo de árvore pode ser um dos principais motivos desse desvio. Além disso, Liu, Zheng e Zhao (2018) reforçam que o efeito térmico das árvores, ou seja, das diferenças entre locais próximos sem árvores e áreas sombreadas, são todos subestimados no ENVI-met para cada variável do microclima.

Em relação aos modelos disponíveis de árvores até a versão 4, Liu, Zheng e Zhao (2018) ainda apontam dois problemas. O primeiro é de que avaliações de espécies de árvores em regiões de clima subtropical quente-úmido ainda estão faltando. Uma vez que as avaliações existentes são principalmente de espécies de árvores em regiões de alta latitude, e essas espécies são totalmente diferentes das espécies de árvores em áreas subtropicais. O segundo é que as avaliações dos efeitos térmicos das árvores ainda são escassas. As avaliações existentes enfocam principalmente a taxa de transpiração, e poucas enfocam sistematicamente os efeitos térmicos das árvores. Para pesquisas em ambientes térmicos externos, a precisão da simulação do efeito térmico das árvores é significativa, pois esses efeitos afetam diretamente a precisão dos resultados da simulação como um todo.

Mesmo com o nível de detalhamento possível do software, processo de detalhamento pode levar muito tempo, nesse sentido LIU et al. (2021) argumentam que a maior parte dos estudos acabam usando árvores representativas, alguns modelos ou apenas um, dependendo do objetivo da pesquisa, sendo que a maior parte adotou apenas uma árvore representativa no local de estudo.

Os processos de cálculo estão em constante aperfeiçoamento, até a versão 4, as árvores em modelos de microclima são representadas apenas por aglomerados mais ou menos homogêneos de densidade de área foliar, não levando em conta a diversidade interna do dossel ou características das espécies, nem por estímulos climáticos locais para o crescimento de aglomerados de folhas mais densos em direções específicas (SIMON; SINSEL; BRUSE, 2020). Ouyang et al. (2022) expõe em seu estudo de análise de sensibilidade do ENVI-met, aplicado na península de Hong Kong, que o módulo de radiação *Index View Sphere* (IVS), foi

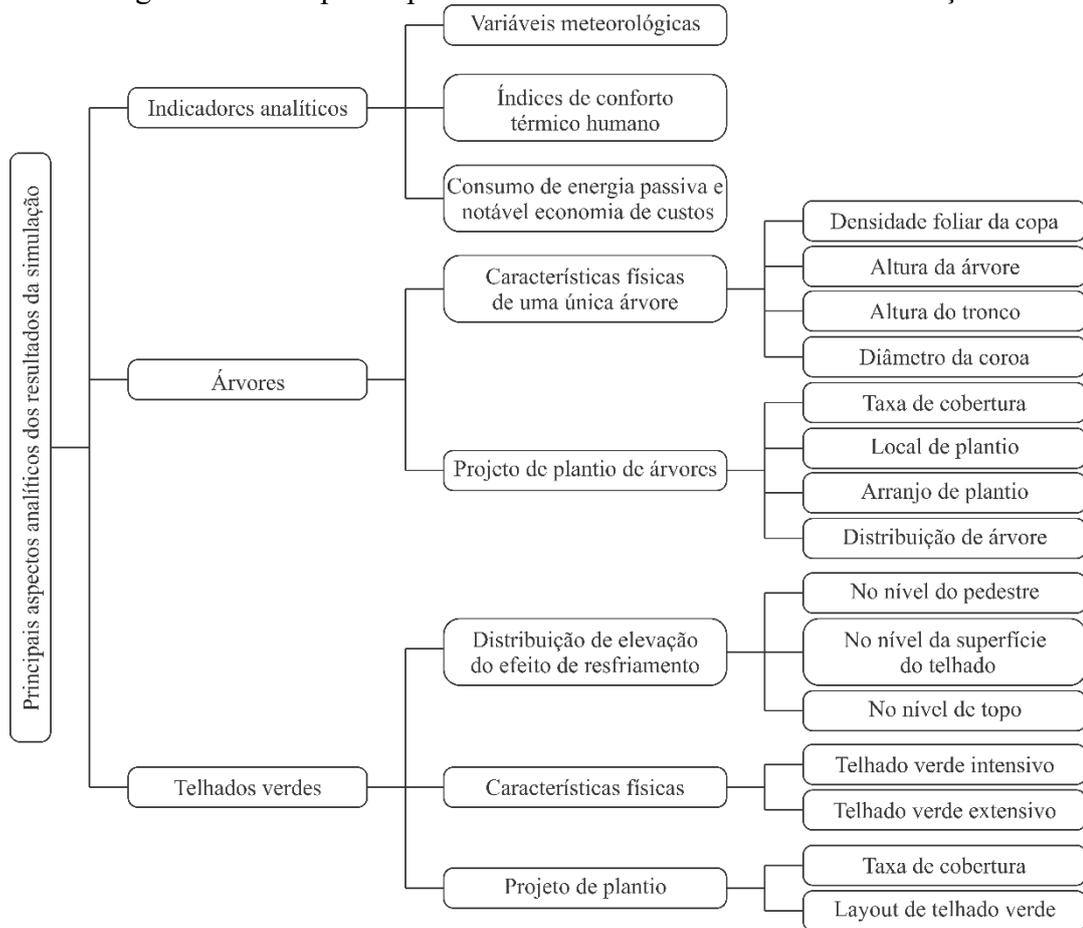
implementado na versão 4.4 e consiste em um novo esquema avançado de transferência de radiação, que promete um cálculo mais detalhado da transferência radiativa secundária, no entanto, os autores ainda expõem uma variação para a temperatura média radiante entre modelos simulados em comparação à locais de medição, apontando como uma possível razão em que a  $T_{mrt}$  flutua amplamente em direção à radiação solar e ao ambiente circundante, o que pode não ser explicitamente imitado pelo ENVI-met, especialmente quando um modelo grosso é comparado com dados de referência mais finos.

As entradas e análises de dados são realizadas em grades espaciais. As dimensões espaciais do grão são consideradas  $0,5 \times 0,5m$  e  $1 \times 1m$ , especialmente em espaços internos e externos pequenos, enquanto pode ser  $2 \times 2m$ ,  $4 \times 4m$ ,  $5 \times 5m$  e  $10 \times 10m$  em áreas externas, dependendo da complexidade (ALTUNKASA; USLU, 2020) e nível de detalhe buscado.

Os dados de umidade específica são baseados na quantidade de água no ar. O ar mais quente pode absorver muito mais água do que o ar quente normal, variando conforme os dados de pressão atmosférica, umidade relativa e temperatura do ar. Nas simulações feitas com o modelo *SimpleForcing*, esses valores devem ser inseridos manualmente, no caso de simulações *FullForcing*, esse valor da umidade específica em 2500m é lido pelo ENVI-met diretamente pelos dados do arquivo *.EPW* inserido (ENVI-MET - DECODE URBAN NATURE WITH ENVI-MET SOFTWARE, 2021).

Conforme Liu et al. (2021), os principais aspectos analíticos dos resultados das simulações pelo ENVI-met são retratados na Figura 2. Os parâmetros que podem ser configurados têm base nos indicadores analíticos e nas configurações dos elementos vegetados.

Figura 2 - Principais aspectos analíticos dos resultados da simulação



Fonte: Adaptado de (LIU et al., 2021)

É importante se fazer uma validação antes da simulação, Huttner (2012) argumenta que embora o ENVI-met tenha uma base física sólida, a simulação não representa totalmente o mundo real devido ao uso de aproximações e que para encurtar o tempo de simulação, o ENVI-met simplifica alguns cálculos de modelos de vegetação como; na radiação, onde as plantas não influenciam a radiação de ondas curtas refletida, as plantas não influenciam a radiação de ondas curtas difundida e a radiação de ondas curtas espalhada para cima pelo solo e vegetação não é levada em consideração, a radiação de onda longa emitida por plantas e superfícies próximas não é calculada com base na temperatura das superfícies e folhas individuais dentro do campo de visão, mas sim em uma temperatura média; no processo de evapotranspiração, a convecção de calor entre a superfície da folha e o ar circundante e a transferência de calor por radiação entre a superfície da folha, o céu e as superfícies do solo não são levadas em consideração e Simon (2016) também apresenta que o armazenamento de calor para folhas também não é levado em consideração. Observando essas simplificações nota-se essa importância da validação dos dados de entrada.

Segundo Liu et al. (2021), as variáveis mais avaliadas pelos últimos estudos são em ordem de frequência, a temperatura do ar (92,59%), umidade relativa (27,78%) e temperatura radiante média (12,96%). Já a temperatura superficial, velocidade do vento, radiação solar, radiação de onda longa e temperatura fisiológica equivalente (PET) são vistos em menos de 10% dos estudos analisados pelo autor.

É observado também limitações do ENVI-met em relação às simulações já feitas, Liu et al. (2021) discutem que na modelagem, pela questão de tempo, os dados de entrada são assumidos em vez de medidos, incluindo as propriedades térmicas dos edifícios e as propriedades das árvores, generalizando-as. Erros não sistemáticos de operações experimentais como o calor antropogênico gerado por humanos, veículos e sistemas mecânicos de resfriamento que não são contabilizados, a energia solar transmitida através de um dossel não uniforme pode superestimar a radiação solar, o erro de medição da densidade de área foliar pode influenciar a distribuição da folhagem e também pode introduzir incertezas, os dados de inicialização de temperatura do ar e umidade relativa podem ser obtidos de estações meteorológicas próximas, podendo ser diferentes do local experimental. Entretanto, Tsoka, Tsikaloudaki e Theodosiou (2018) ressaltam que mesmo com os avanços e vantagens da nova versão, ainda há uma discussão na literatura existente que aponta alguns pontos fracos relevantes envolvendo o cálculo geral dos fluxos de radiação, o modelo de turbulência aplicado *Yamada* e *Mellor E-ε*, tendendo a superestimar a produção turbulenta em áreas de alta aceleração, a geração da rede CFD, a falta de informação sobre os fenômenos da parede próxima, o fato de que não é possível forçar totalmente as características do fluxo atmosférico envolvendo velocidade e direção do vento. Importante ressaltar que a demanda de tempo de processamento da simulação ainda é um problema, o que limita consequentemente o tamanho da área a ser analisada, inclusive havendo limitação interna no software.

Santos, Silva e Tenedório (2019) apontam que a principal restrição no ENVI-met, até a versão 4, são os valores especificados para os tipos funcionais de vegetação e a sua forma (forma, estrutura e tamanho). Estes são amplos e generalizados e não específicos para espécies individuais. Uma descrição detalhada das espécies utilizadas na requalificação da área a ser estudada permitiria refinar os resultados. No entanto, a contribuição da vegetação como fator de mitigação deve ser quantificada no planejamento de novas áreas urbanas e o ENVI-met demonstrou sua eficiência nesse objetivo.

Apesar de a temperatura do ar ser uma das variáveis mais extraídas do ENVI-met, Rahul, Mukherjee e Sood (2020), relatam que análises somente com ela não são suficientes para

investigação do estresse térmico. A temperatura média radiante é altamente influenciada pelo resultado de sombreamento de árvores e pelo corpo humano exposto a fluxos de radiação de ondas curtas e longas. Tan, Lau e Ng (2016) relacionam a condição do vento como um fator que está associado ao conforto térmico humano e aos efeitos da vegetação, uma vez que a vegetação se comporta como um organismo vivo e interage com as superfícies subjacentes e sobrejacentes (MORAKINYO et al., 2018).

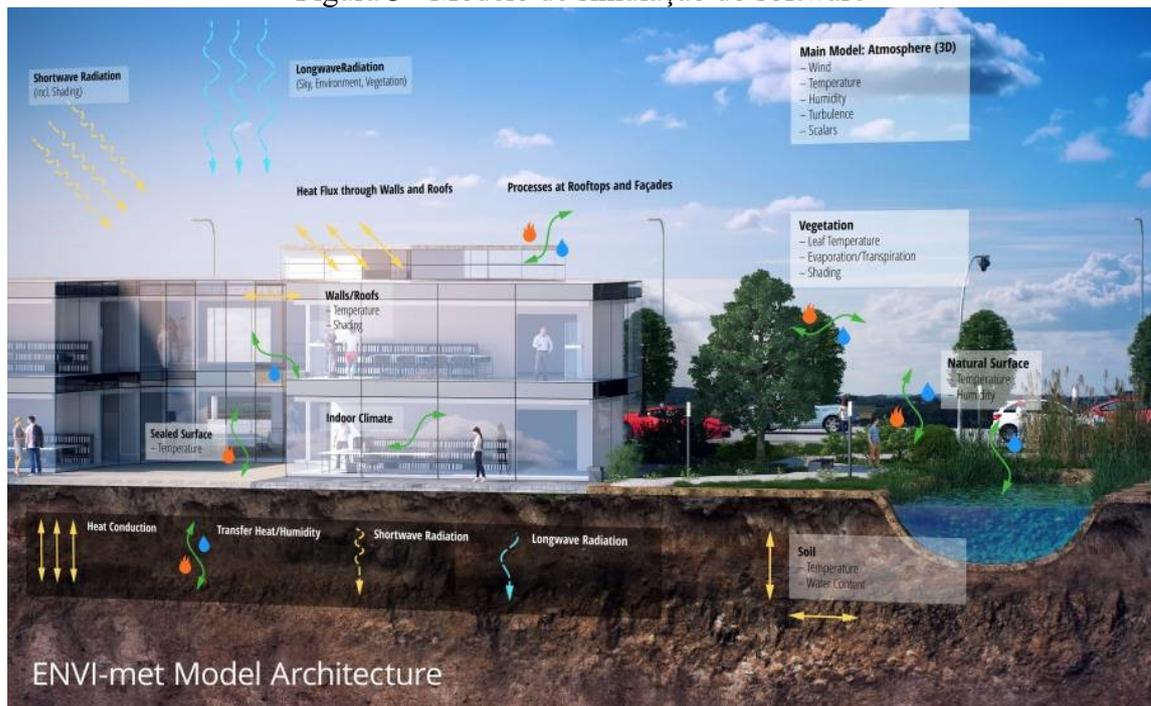
A altura para as análises são normalmente em 1,5m e 2m, altura do pedestre, os horários usualmente simulados são às 15:00 horas, tipicamente um horário mais quente do dia, geralmente é o horário com maior diferença entre o conforto térmico em áreas abertas e vegetadas e também pode haver um fluxo maior de residentes desempenhando atividades ao ar livre. Embora, se encontre muitos estudos também simulados às 12:00 horas e também às 20:00 horas para se analisar o efeito noturno (LIU et al., 2021).

Dentre as quatro possibilidades de análise referentes aos índices de conforto dentro do software, o índice PET (*Physiological Equivalent Temperature*) é considerado por Liu et al. (2021) o mais abrangente, sendo o mais utilizado nas simulações com o ENVI-met na última década. As principais razões apresentadas pelo autor são a abrangência de um microclima externo e elementos humanos, tornando-o mais aceitável e adequado para avaliar o conforto térmico humano ao ar livre. É uma função de quatro variáveis meteorológicas principais de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura média radiante. Também considera diferenças quando analisa os elementos humanos como gênero, altura, idade, peso, vestimentas, resistência ao calor e atividade metabólica. É um índice amplamente utilizado em análises climatológicas urbanas e por esse motivo é mais viável a comparação entre estudos de diferentes regiões e zonas térmicas. Por seu resultado ser expresso em Celsius, é mais compreensível para pessoas não familiarizadas com a terminologia biometeorológica humana. Os outros índices analisados pelo software são o PMV (*Predicted Mean Vote*) também sendo adotado por muitos estudos, UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) e TEP (*Temperature of Equivalent Perception*).

O cálculo do modelo ENVI-met inclui fluxos de radiação de ondas curtas e longas com relação ao sombreamento, reflexão e re-radiação de sistemas de construção e da vegetação; transpiração, evaporação e fluxo de calor sensível da vegetação para o ar, incluindo simulação completa de todos os parâmetros físicos da planta; cálculo dinâmico da temperatura da superfície e da temperatura da parede para cada elemento de fachada e telhado que suporta até 3 camadas de materiais e 7 pontos de cálculo na parede/telhado; troca de água e calor dentro do

sistema do solo, incluindo absorção de água pela planta; representação 3D da vegetação, incluindo modelagem dinâmica do balanço hídrico das espécies individuais; e dispersão de gases e partículas. O modelo suporta partículas (incluindo sedimentação e deposição em folhas e superfícies), gases inertes e gases reativos do ciclo de reação NO-NO<sup>2</sup>-Ozônio (ENVI-MET - DECODE URBAN NATURE WITH ENVI-MET SOFTWARE, 2021). Na Figura 3 é apresentado um modelo resumido de como o software faz a análise dos dados.

Figura 3 - Modelo de simulação do software



Fonte: Adaptado de (ENVI-MET - DECODE URBAN NATURE WITH ENVI-MET SOFTWARE, 2021).

Softwares com maior difusão como *EnergyPlus* e *Design Builder*, são ferramentas que podem ser acopladas às simulações do ENVI-met. Para a versão 5 foi apresentada a possibilidade de integração com o software de programação Python. Usando arquivos de dados meteorológicos EPW (*EnergyPlus Weather*), Aboelata (2021), por exemplo, exibe resultados de economia interna de energia em edificações com a alteração do telhado e fachadas para elementos vegetados. Berardi (2016), com estudos referentes aos telhados verdes, acrescenta que o aumento do índice de área foliar provoca impactos positivos no efeito de resfriamento a nível do pedestre, mas a profundidade do solo afeta mais na economia de energia interna. Peng et al. (2020) relatam que em relação às fachadas verdes, quando aplicadas em escala de blocos, teriam o poder de melhorar o microclima do nível do pedestre, embora alguns estudos como de Acero et al. (2019) não tenha identificado benefícios significativos quando aplicados a partir de

certa altura das paredes das edificações, recomendando uma altura crítica de 6 metros para benefícios para o pedestre.

## 2.8 SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA

É notado que com o crescimento e desenvolvimento das cidades são necessários meios para tornar os centros urbanos ambientes mais resilientes e adaptados ao clima atual e futuro. Os autores citados indicam elementos vegetados como uma das medidas de mitigação ao calor urbano, problema que ocorre e afeta diretamente a população. Nesse contexto, a vegetação é apontada como elemento propulsor de benefícios para a saúde da cidade. Como principal efeito, o sombreamento é altamente indicado, porém não são realizadas tantas comparações com o tipo e variações de materiais para esse fim.

Há um aumento no número de pesquisas sobre o tema, o que se torna correspondente à necessidade de dados e estudos por responsáveis do planejamento urbano para a tomada de decisões. Apesar dos pontos positivos apresentados, deve haver estudos para que os efeitos negativos possam ser evitados ou controlados, uma vez que os pontos positivos se sobressaem e justificam sua implantação.

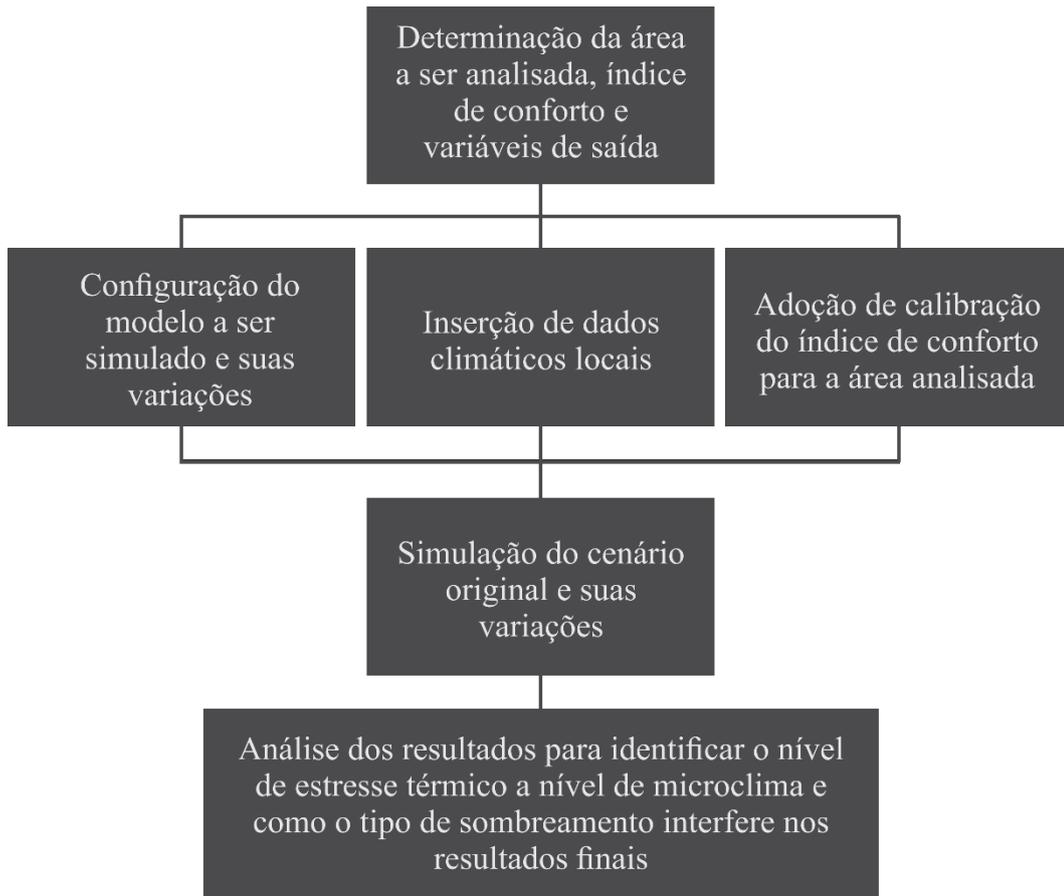
Para se qualificar o conforto térmico foram criados índices que levam em conta variáveis ambientais e humanas. Esses índices vêm sendo adaptados ao longo do tempo conforme os estudos foram ocorrendo. O índice PET é visto como um dos índices mais utilizados em pesquisas recentes.

O desenvolvimento de softwares vem evoluindo com o passar do tempo e os modelos CFD apresentam vantagens em relação aos de modelos EBM, atuando e integrando os quatro sistemas principais: solo, vegetação, atmosfera e construção. Também é notado que o ENVI-met se destaca no meio acadêmico atual.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a área a ser analisada, os softwares que foram utilizados e os parâmetros adotados para a simulação. O fluxograma do método é retratado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do método



Para a determinação da área foram levadas em consideração características desejáveis para as simulações, como densidade de edificações entre média e baixa, para que a radiação solar pudesse ter influência no ambiente externo, uso atual por pedestres e a quantidade de vegetação distribuída existente. A área tem proximidade com equipamentos urbanos, que geram alto fluxo de pedestres.

Após definida, a área foi modelada, configurada e feitas as variações de parâmetros da quantidade de vegetação para cada simulação. Com a inserção dos dados climáticos locais e a adoção da calibração da faixa de conforto para o índice de conforto foi possível simular os cenários.

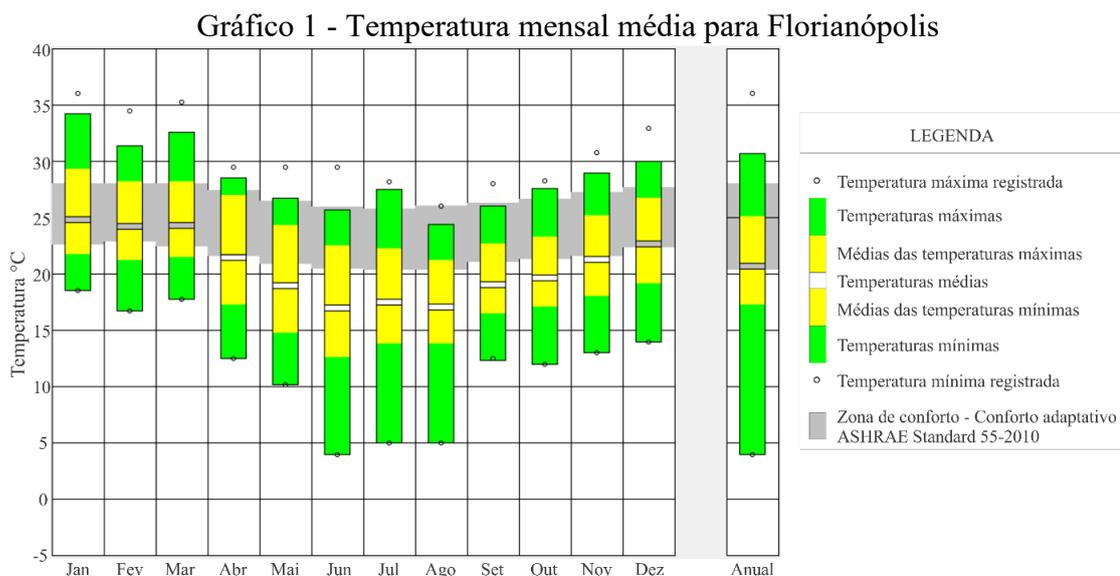
A última etapa corresponde à análise dos resultados, avaliando os dois tipos de sombreamento relacionando com o estresse térmico humano em microclimas urbanos, bem como a temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade relativa e velocidade do ar em quatro modelos.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA

O estudo foi realizado baseado na cidade de Florianópolis, Santa Catarina, no sul do Brasil, que se encontra a uma altitude de 7m em relação ao nível do mar. A cidade é classificada por Köppen-Geiger como Cfa (KOTTEK et al., 2006), com clima temperado chuvosos, moderadamente quente e úmido, já pela ABNT (2003), é classificada como Zona Bioclimática 3.

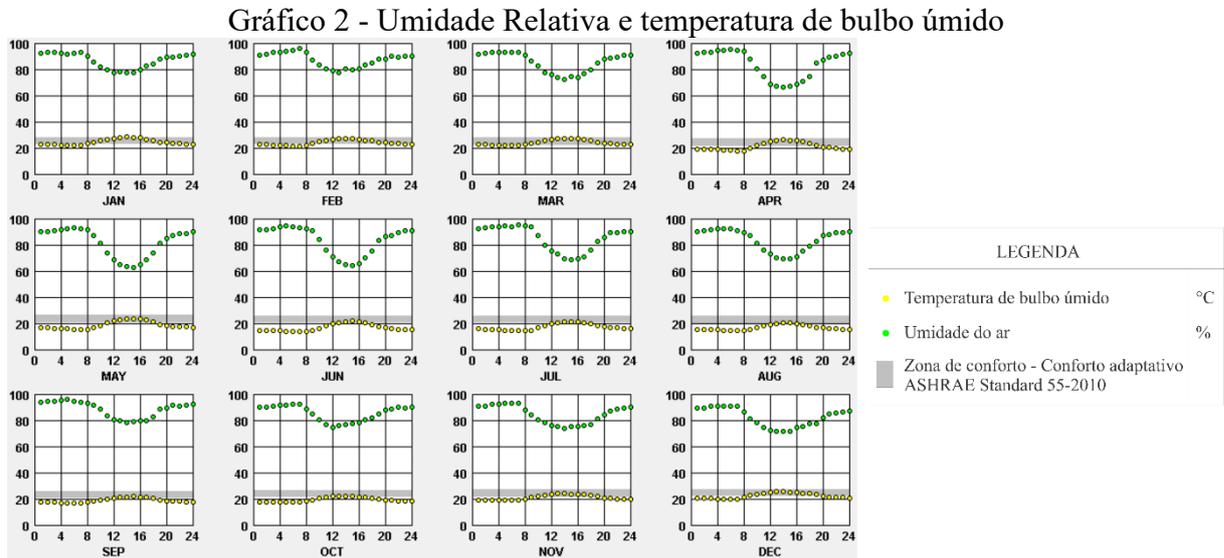
Para representação e avaliação dos dados climáticos de Florianópolis, foi utilizado o arquivo climático no formato *.EPW* do tipo TRY (*Test Reference Year*) (INMET, 2018), representando um ano de referência para testes, o qual foi inserido no software *Climate Consultant 6.0* para geração dos gráficos.

O Gráfico 1 expõe as temperaturas médias mensais e também as máximas e as mínimas registradas. Florianópolis apresenta temperatura anual média de 20,6°C, com média mensal máxima de 24,7°C em janeiro e mínima de 16,9°C em junho.



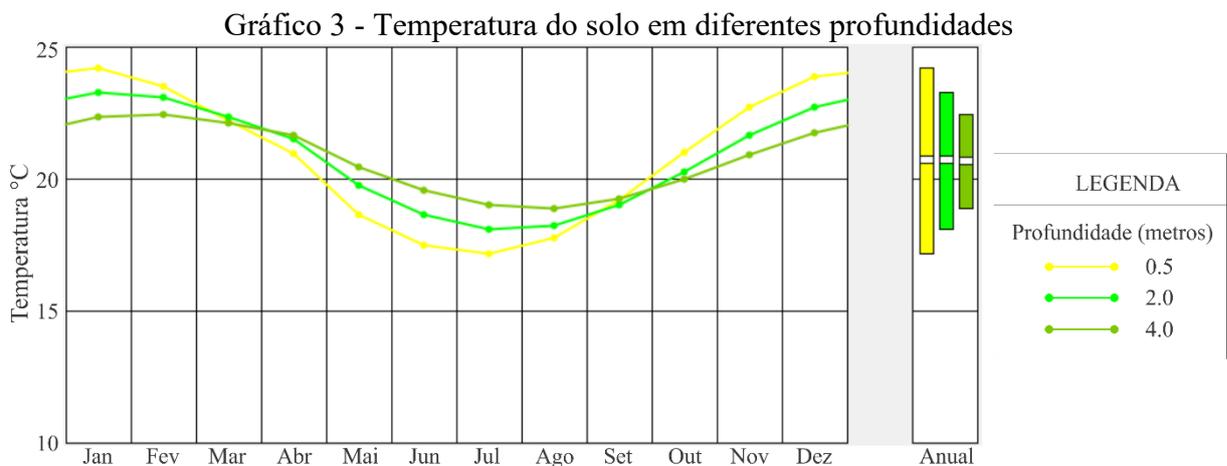
Fonte: Adaptado de *Climate Consultant 6.0* com dados de (INMET, 2018).

A umidade relativa do ar média anual é de 85%, tendo médias mensais de 82% em maio e 88,7% em setembro. O Gráfico 2 apresenta dados combinados de temperatura do ar com umidade relativa durante os meses do ano.



Fonte: Adaptado de *Climate Consultant 6.0* com dados de (INMET, 2018).

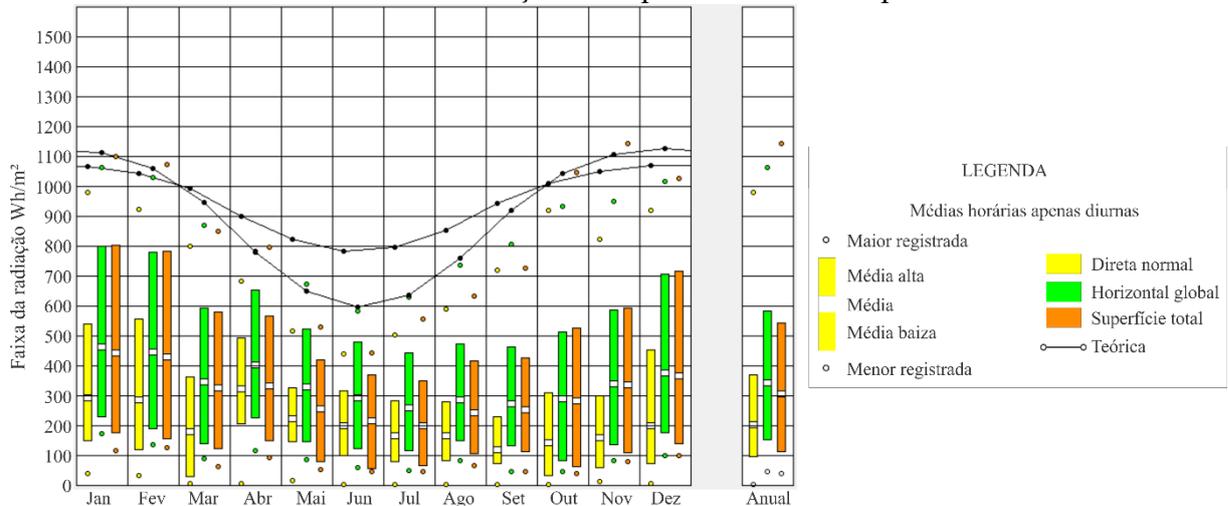
A temperatura do solo varia conforme a sua profundidade, demonstradas no Gráfico 3, uma maior amplitude é notada nas camadas mais superficiais. A temperatura média mensal a 0,5m de profundidade varia entre cerca de 24 a 18°C. Já a temperatura do solo em um nível mais profundo, a 4m, tem amplitude menor, variando entre 23 a 19°C.



Fonte: Adaptado de *Climate Consultant 6.0* com dados de (INMET, 2018).

A radiação solar, fator importante nos resultados do conforto térmico externo, é apresentada no Gráfico 4, no qual são detalhadas a radiação normal, a radiação horizontal global e a radiação superficial total, esta última incidente em uma superfície horizontal. Os valores nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro apresentam níveis mais elevados de radiação direta e global, alcançado os níveis médios de aproximadamente 500Wh/m<sup>2</sup>. Nos meses do período de inverno, maio, junho e julho esses níveis médios ficam entre 200 e 300Wh/m<sup>2</sup>.

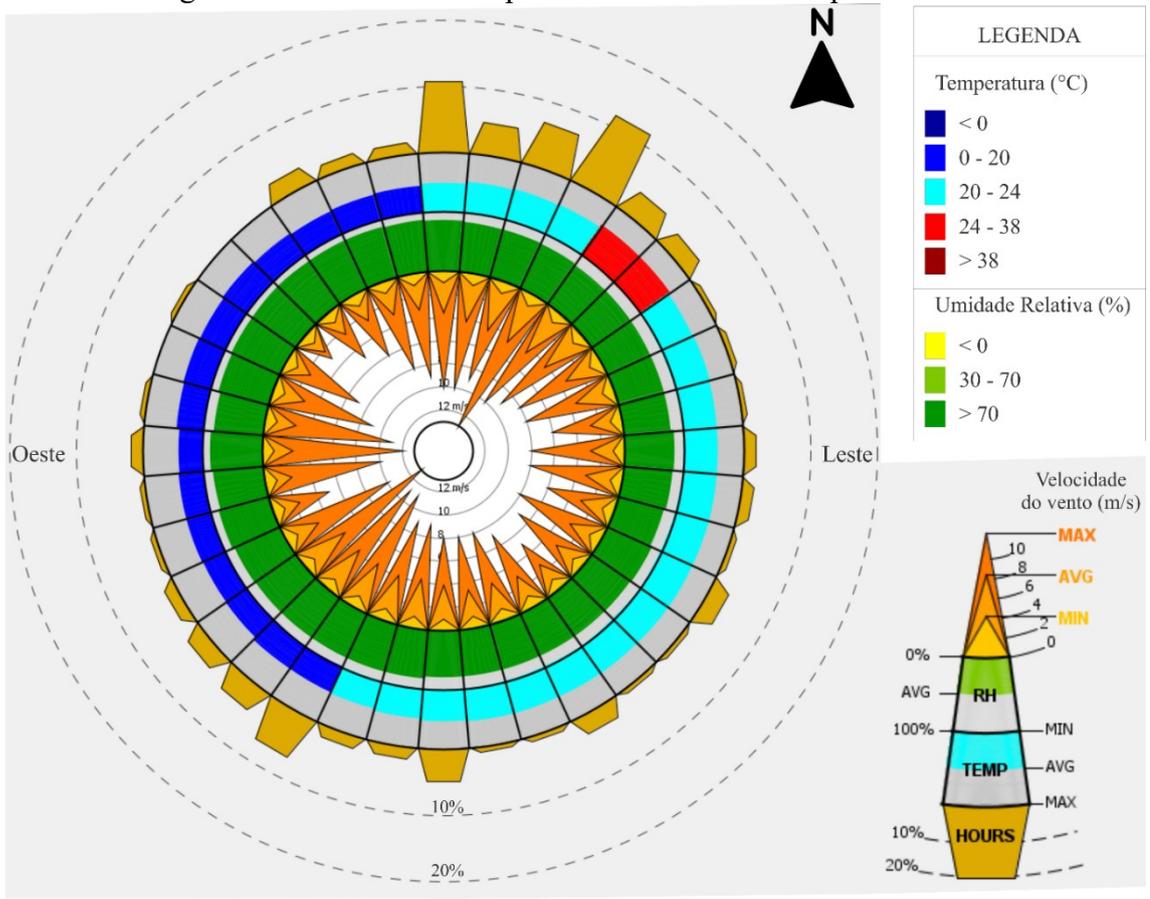
Gráfico 4 - Radiação solar por área - Florianópolis



Fonte: Adaptado de *Climate Consultant 6.0* com dados de (INMET, 2018).

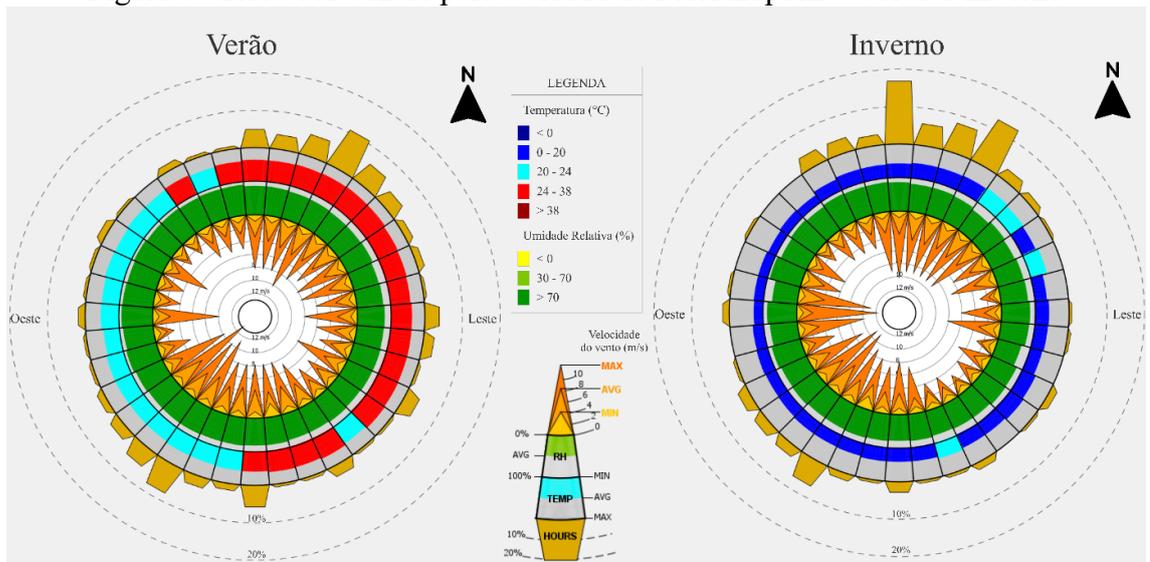
Outra variável importante para a percepção do ambiente externo são as características de intensidade, umidade relativa e temperatura dos ventos. Na Figura 5 pode ser observada a rosa dos ventos para a cidade de Florianópolis com médias anuais, a Figura 6 apresenta as médias separadas para as estações de verão e inverno, respectivamente. As velocidades médias anuais ficam entre 2 a 3m/s. Destaca-se que a umidade relativa permanece com média anual, na estação do inverno e do verão, acima de 70%. Já em relação às temperaturas, podemos notar que no mês de inverno ter prevalência de temperaturas entre 0 e 20°C e no verão variam entre 20 a 38°C.

Figura 5 - Rosa dos ventos para a cidade de Florianópolis - Anual



Fonte: Adaptado de *Climate Consultant 6.0* com dados de (INMET, 2018).

Figura 6 - Rosa dos ventos para a cidade de Florianópolis - Verão e Inverno

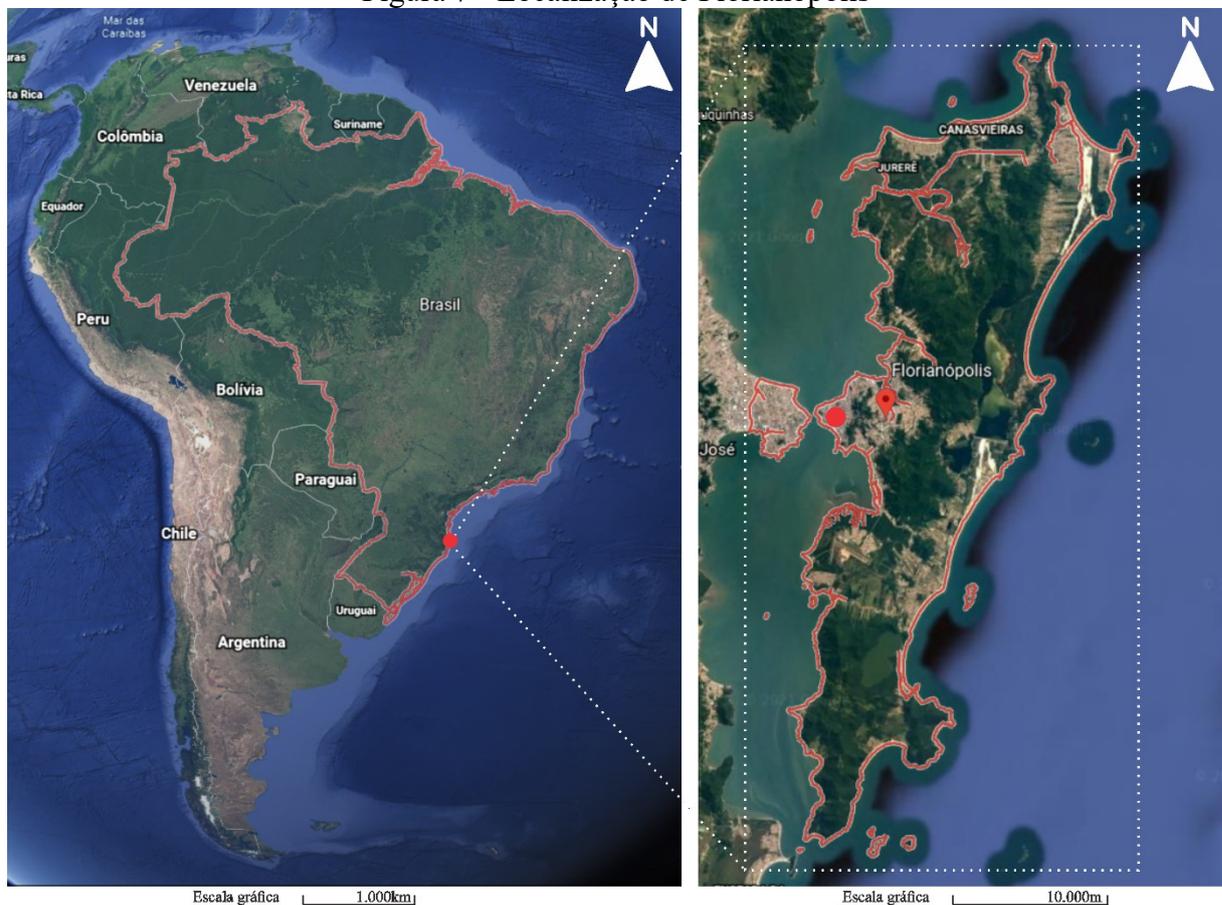


Fonte: Adaptado de *Climate Consultant 6.0* com dados de (INMET, 2018).

### 3.2 APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ANÁLISE

Florianópolis se localiza no estado de Santa Catarina, no sul do Brasil, com a latitude  $-27.59^\circ$  e longitude  $-48.55^\circ$ . É uma cidade litorânea que tem a maior parcela territorial cercada pelo Oceano Atlântico, com pequena parcela continental que faz limite com a cidade de São José. Apresenta uma geometria bastante irregular, contando com dimensões aproximadas de 55 km no sentido Norte-Sul e 15 km no sentido Leste-Oeste.

Figura 7 - Localização de Florianópolis



Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

A área a ser analisada se encontra no centro da cidade de Florianópolis, constitui-se com prédios de caráter histórico, bem como suas ruas, com uma caixa viária menor e revestimento em pedra portuguesa, paver e asfalto. Contempla também o espaço do Mercado Público Municipal e o novo espaço do Largo da Alfândega. As ruas de limite de análise são a Avenida Paulo Fontes com a Rua Felipe Schmidt e a Rua Jerônimo Coelho com a Rua Arcipreste Paiva. Os espaços centrais de análise contemplam a Rua Conselheiro Mafra, Rua

Deodoro, Rua Trajano, além do Largo da Alfândega e o Mercado Público. A localização é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Localização da área analisada



Escala gráfica  100m

Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

O espaço do Largo da Alfândega recebeu um projeto de revitalização, iniciado no final de 2018 e entregue no início de 2020, o qual diminuiu o percentual de vegetação existente, substituindo parte desse sombreamento de árvores por uma estrutura metálica de sombreamento (Figura 9). É um local com alto fluxo de pedestres, isso pode ser explicado pela proximidade com o Terminal de Integração Rodoviário do Centro (TICEN), espaços públicos de lazer como o Mercado Público de Florianópolis, as praças municipais e tem a ocupação térrea dos edifícios principalmente pelo setor comercial. Apresenta poucas áreas significativamente arborizadas, a não ser pontos isolados no Largo da Alfândega e a proximidade com a Praça XV de Novembro. Nas coberturas das edificações, não é identificado nenhum telhado verde a não ser na nova edificação que serve como base no novo Largo da Alfândega, tem predominância em telhas cerâmicas, fibrocimento e metálica. As construções são predominantemente em alvenaria e não

é apontada nenhuma parede com elementos vegetados. É um importante ponto de tráfego de pedestres na cidade caracterizado por equipamentos urbanos de seu entorno.

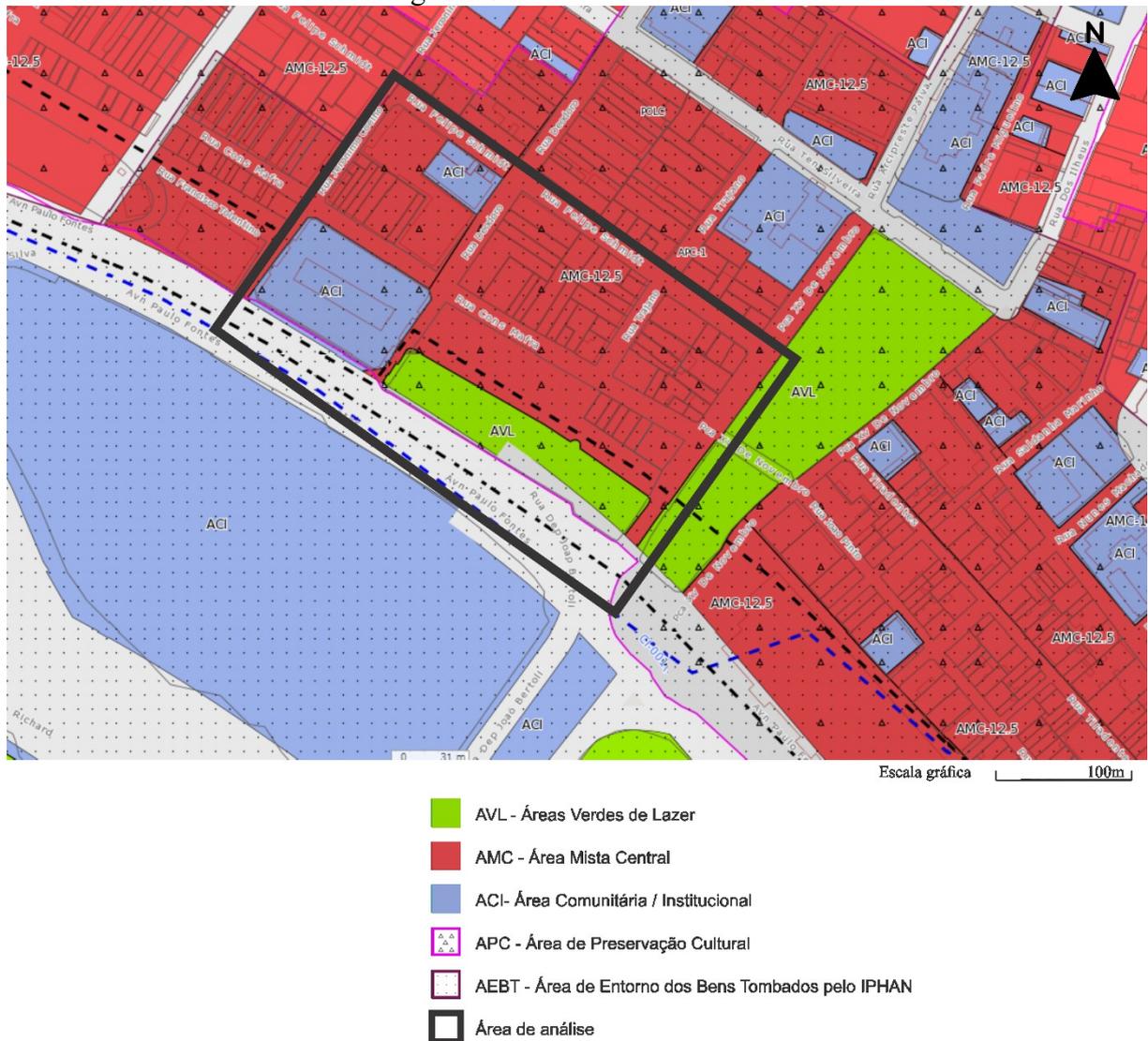
Figura 9 - Revitalização do Largo da Alfândega



Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

Conforme a Prefeitura Municipal de Florianópolis (2014), a maior parte da área em análise, definida pelo Plano Diretor, são AMC – Área Mista Central, encontra-se duas áreas classificadas como AVL – Áreas Verdes de Lazer e duas áreas como ACI – Área Comunitária / Institucional. A Figura 10 demarca a área de análise.

Figura 10 - Zoneamento urbano



Fonte: Adaptado de <http://geo.pmf.sc.gov.br/> (2021)

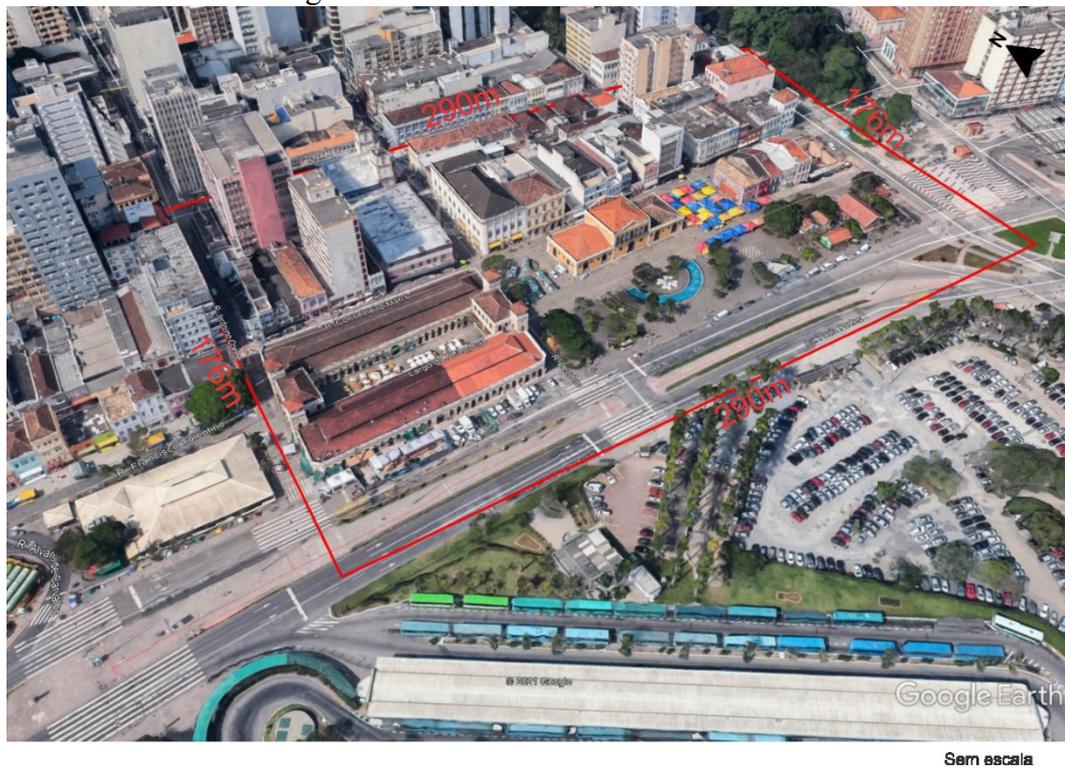
Em relação às dimensões, a área possui 290m de extensão na Rua Felipe Schmidt e Avenida Paulo Fontes e 176m na Rua Jerônimo Coelho e Rua Arcipreste Paiva, somando 51.040m<sup>2</sup>. As vias internas da área têm largura variando entre 9 a 14m. A Figura 11 expõe a localização das vias analisadas. No que se refere à densidade urbana existente, tem predominância por edificações de porte baixo, entre 3 e 4 pavimentos, ao norte possui edifícios de maior altura, chegando a 12 andares. Podemos observá-los na Figura 12.

Figura 11 - Localização das vias analisadas



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021).

Figura 12 - Vista aérea da área analisada



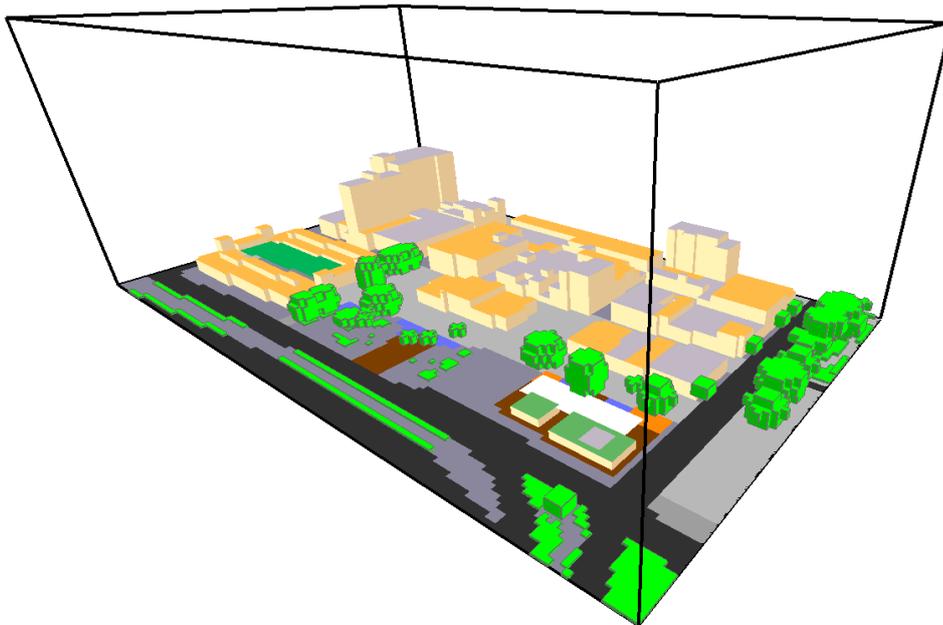
Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

### 3.3 DETERMINAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

O software ENVI-met, versão 4.4.6 (ENVI-MET - DECODE URBAN NATURE WITH ENVI-MET SOFTWARE, 2021), foi escolhido para as simulações por suas funcionalidades como a possibilidade de modelagem de elementos vegetados, que inclui o cálculo da temperatura das folhas individualmente em cada célula da grade do modelo, levando em consideração a taxa fotossintética, a disponibilidade de água no solo e a taxa de evapotranspiração local. Além disso, como já mencionado, tem amplo uso no meio acadêmico, possibilitando que esse estudo seja comparado com a maior parte de pesquisas desse meio que estão sendo desenvolvidas.

Seu modelo é projetado em uma grade retangular 3D. Para a modelagem foi considerada a modulação de 2 por 2 metros e 3 metros de altura. A área é retangular com 290 por 176 metros, resultando em uma modulação de 145 por 88. Para a altura do modelo, deve ser considerada a parte mais alta de todos os edifícios e adicionar mais duas partes iguais com espaço livre para que a ventilação ocorra de forma correta. A parte mais alta foi de 108 metros, com a modulação total de altura de 36. A modelagem da área selecionada pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 - Área do modelo original



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021).

O levantamento da área foi feito com base em visitas à campo e também através de imagens de satélite do *Google Earth*. Para representar a cobertura foram usadas 3 tipologias; a primeira engloba telhados em concreto e fibrocimento; a segunda, telhas cerâmicas e; a terceira o telhado verde presente no Largo da Alfândega, com uma espessura total de 25cm. Para simplificação do material das paredes, foi configurado um material padrão, o qual representa uma parede em alvenaria, com absorvância de cores em tons claros de 0,30, acompanhando os tons das paredes existentes na área. Para o solo foram configurados cinco tipos; o asfalto; o pavimento de concreto claro que abrange revestimentos em piso de concreto bruto e placas cimentícias; o pavimento de concreto escuro, que representa o paver e concretos com mais tempo de uso e mais escuros; pedra, representando revestimentos em pedras, granitos em formato de paralelepípedos; madeira, presente no novo Largo da Alfândega; além de terra para solos descobertos e grama. As fontes de água presente no Largo da Alfândega foram configuradas com o material padrão do software, alterando a profundidade para 1,5m. Foram usadas as temperaturas e porcentagem de umidade do solo padrão do software.

Para os elementos de cobertura que servem como sombreamento, existentes em dois locais no modelo original (no centro do Mercado Público e na cobertura do Largo da Alfândega), foram utilizados os sistemas de *Single-Walls* do ENVI-met, com o qual é possível modelar coberturas sem a necessidade de ter um volume abaixo dela. Na área central do Mercado Público, há uma cobertura que possibilita a ventilação lateral, ela foi configurada com características dos materiais do software, já a cobertura do Largo da Alfândega é metálica. A configuração de todos os materiais utilizados foram com base nos padrões do software ENVI-met (2021) e na norma ABNT NBR 15220-2 (2005b).

As árvores foram configuradas combinando as características da vegetação existente com o banco de dados do ENVI-met, buscando aproximar-se das características de altura, copa, densidade foliar e sazonalidade. A Figura 14 localiza e demarca a vegetação existente e a Tabela 3 relaciona os modelos utilizados, as alterações feitas e se a planta é caducifolia ou não.

Figura 14 - Demarcação de Vegetação Existente

Escala gráfica  50m

Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

Tabela 3 - Relação de vegetação existente

Nº	Espécie	Editada do modelo base do ENVI-met	Alteração feita	Caducifólia
1	Tipuana	Spherical, large trunk, sparse, large (15m)	Diâmetro de 11m para 13m	Sim
2	Tipuana	Spherical, large trunk, sparse, large (15m)	Diâmetro de 11m para 13m	Sim
3	Ipê roxo	Cylindric, small trunk, sparse, medium (15m)	-	Sim
4	Amendoeira da praia	Heart-shaped, small trunk, dense, medium (15m)	Altura de 15m para 10m e diâmetro de 13m para 9m LAD de 1.1 para 0.6	Sim
5	Amendoeira da praia	Heart-shaped, small trunk, dense, medium (15m)	Altura de 15m para 10m e diâmetro de 13m para 9m LAD de 1.1 para 0.6	Sim
6	Flamboyant	Albizia Julibrissin	Altura de 11m para 5m	Sim
7	Tipuana	Spherical, large trunk, sparse, large (15m)	Diâmetro de 11m para 13m	Sim
8	Palmeira imperial	Palm, large trunk, dense, small (5m)	Altura de 5m para 10m e diâmetro de 3m para 5m	Não

9	Palmeira imperial	Palm, large trunk, dense, small (5m)	Altura de 5m para 10m e diâmetro de 3m para 5m	Não
10	Palmeira imperial	Palm, large trunk, dense, small (5m)	Altura de 5m para 10m e diâmetro de 3m para 5m	Não
11	Palmeira imperial	Palm, large trunk, dense, small (5m)	Altura de 5m para 10m e diâmetro de 3m para 5m	Não
12	Palmeira imperial	Palm, large trunk, dense, small (5m)	Altura de 5m para 10m e diâmetro de 3m para 5m	Não
13	Tipuana	Spherical, large trunk, sparse, large (15m)	Diâmetro de 11m para 13m	Sim
14	Amoreira	Cylindric, medium trunk, sparse, medium (15m)	Sem alteração	Sim
15	Palmeira imperial	Palm, large trunk, dense, small (5m)	Altura de 5 para 10 e diâmetro de 3 para 5m	Não
16	Figueira-benjamina	Spherical, large trunk, sparse, medium (15m)	Sem alteração	Sim
17	Araçazeiro	Heart-shaped, small trunk, sparse, small (5m)	Sem alteração	Sim
18	Pata de vaca	Heart-shaped, small trunk, sparse, small (5m)	Sem alteração	Sim
19	Pata de vaca	Heart-shaped, small trunk, sparse, small (5m)	Sem alteração	Sim
20	Pata de vaca	Heart-shaped, small trunk, sparse, small (5m)	Sem alteração	Sim
21	Pata de vaca	Heart-shaped, small trunk, sparse, small (5m)	Sem alteração	Sim
22	Tipuana	Spherical, large trunk, sparse, medium (15m)	Sem alteração	Sim
23	Palmeira imperial	Palm, large trunk, dense, small (5m)	Altura de 5 para 10 e diâmetro de 3 para 5m	Não
24	Amendoeira da praia	Heart-shaped, medium trunk, dense, medium (15m)	Sem alteração	Sim
25	Tipuana	Spherical, large trunk, sparse, medium (15m)	Sem alteração	Sim
26	Flamboyant	Albizia Julibrissin	Sem alteração	Sim
27	Figueira-benjamina	Spherical, large trunk, sparse, medium (15m)	Sem alteração	Sim
28	Flamboyant	Albizia Julibrissin	altura de 11 para 15 e copa de 12 para 16	Sim
29	Figueira-benjamina	Spherical, large trunk, sparse, medium (15m)	Sem alteração	Sim

30	Flamboyant	Albizia Julibrissin	Sem alteração	Sim
31	Flamboyant	Albizia Julibrissin	Sem alteração	Sim
32	Palmeira imperial	Palm, large trunk, dense, small (5m)	Altura de 5 para 10 e diâmetro de 3 para 5m	Não

Fonte: Elaborado pelo autor

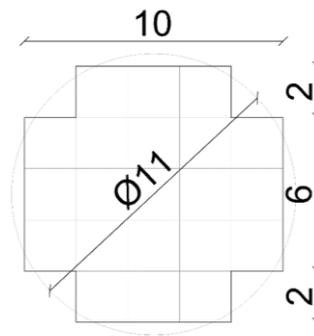
Ao descrever conjuntos de vegetação por métodos geométricos, cada planta tem sua própria forma específica e posição espacial, que é adequada para descrever plantas individuais ou conjuntos mais complexos. Como a forma está mais próxima da realidade, é mais benéfico para o cálculo da radiação, mas aumentará a carga de trabalho do cálculo turbulento. Além disso, diferentes formas podem causar erros em modelos empíricos de modelos de turbulência. O módulo ENVI-met *3D-Plant* adota-o, empregando o chamado editor de plantas *Albero* (YANG et al., 2019).

As árvores do modelo original foram escolhidas com base em suas características, buscando aproximações do banco de árvores *3D-Plants* do software. Já para as árvores que foram utilizadas para a variação do modelo vegetado, foram configuradas a partir do modelo *Simple Plant, Tree 20m dense, distinct crown layer*, sem alterações de configurações do modelo padrão do software. Apresentando valores de albedo de 0,20, transmitância de 0,30 e altura de 20 metros. Em relação à folhagem, se caracteriza como caducifólia, parâmetro o qual é alterado entre verão, que possui 100% de folhagem, ao contrário do inverno que permite a entrada de radiação solar direta. A densidade foliar varia conforme sua altura, com sua copa iniciando com 0,005 aos 6m de altura e chegando à 1,15, na altura de 12m. O objetivo é que representem o comportamento de uma Amendoeira da praia (*Terminalia catappa*). Na Figura 15 é possível verificar o formato e as dimensões se encaixando em módulos de 2 x 2m, com 84m<sup>2</sup> de cobertura de superfície.

A escolha de árvores do módulo *Simple Plant* para a variação do modelo vegetado foram baseadas no fato de que podem ocorrer erros recorrentes do programa em seu módulo *3D-Plant*, como já apresentado por Liu, Zheng e Zhao (2018), a qual superestimou a temperatura média radiante e subestimou a temperatura do ar. O módulo de modelagem de plantas com aprimoramentos foi apresentado na versão 5, lançada em 01/11/2021, propõe melhoramentos na modelagem de vegetação com o plugin *Albero L-System Editor* e conta com um banco de espécies mais amplo (ENVI-MET - DECODE URBAN NATURE WITH ENVI-MET SOFTWARE, 2021), contudo, não foi possível aplicar para esta pesquisa.

O elemento de sombra que serviu para a outra variação do modelo original será proporcional à ocupação da árvore base. O material utilizado é o mesmo que o utilizado para a cobertura do espaço central do Mercado Público e buscou representar uma tenda com material com características têxteis de poliéster ou polietileno. Os valores de absorção é de 0,20, reflexão de 0,80, emissividade de 0,90, calor específico de 1470 J/(kg\*K), condutibilidade térmica de 0,19 W/(m\*K) e densidade de 900kg/m<sup>3</sup>.

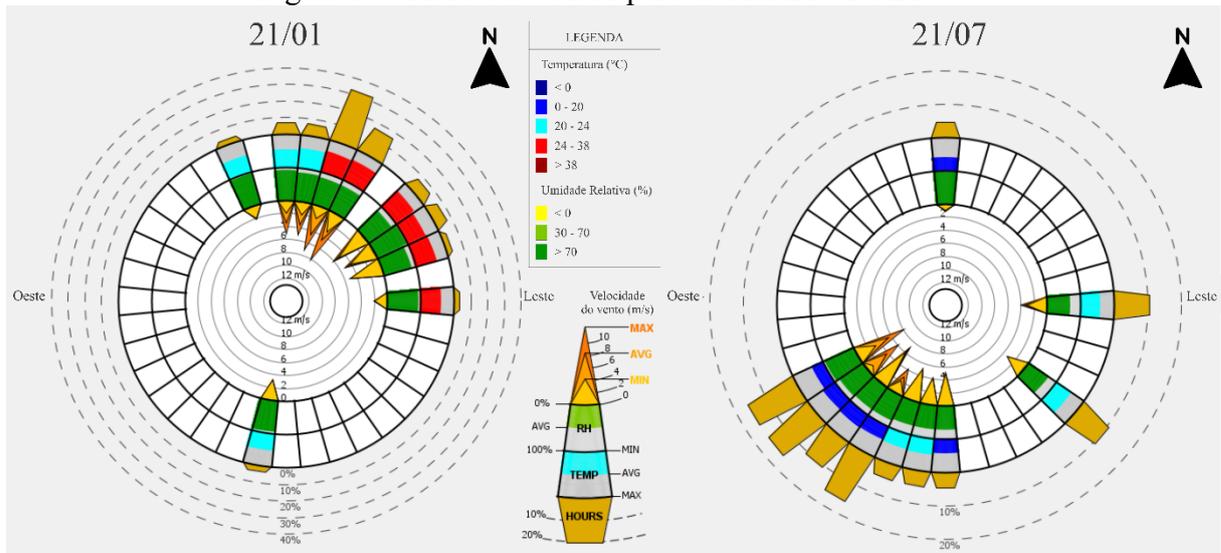
Figura 15 - Área de projeção da área vegetada e do elemento de sombra opaco



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados climáticos foram inseridos através do arquivo climático de dados horários da área analisada, com formato .EPW (*Energy Plus Weather File*) que apresenta os dados meteorológicos de Florianópolis (INMET, 2018) para a integração da simulação. Esse arquivo disponibiliza parâmetros como temperatura, velocidade e direção do ar, temperatura do solo, umidade relativa e radiação. Foi escolhido o arquivo tipo TRY que significa em inglês *Test Reference Year* ou Ano Climático de Referência, por representar um ano de dados médios para um local específico, sem extremos de temperatura. A forma de inserção dos dados climáticos dentro do ENVI-met foi de forma intermediária, usando a função *Full Forcing*, no entanto, os dados de velocidade do ar possuíam variações que o programa não conseguiu interpretar e ocorreram instabilidades nas simulações, ocasionando erros. A recomendação dos desenvolvedores do software nesse caso é de que a velocidade do ar não seja inserida pelo arquivo climático, e sim manualmente. Visto isso, a velocidade do ar foi utilizada com a função *Simple Forcing*, determinada com a ajuda do software *Climate Consultant 6.0*. A velocidade do ar média diária predominante para o dia 21 de janeiro foi inserida com 4m/s e direção de 20°, já para o dia 21 de julho, foi inserida com 3m/s e direção de 240°, como é possível conferir na Figura 16.

Figura 16 - Rosa dos ventos para os dias 21/01 e 21/07.



Fonte: Adaptado de *Climate Consultant 6.0* com dados de (INMET, 2018).

A fim de verificar o funcionamento do modelo foram comparados os dados de entrada do arquivo climático com um ponto do modelo extraindo resultados de uma altura de 1,5m. O ponto escolhido para a comparação foi um local mais afastado de elementos que pudessem interferir nos resultados, como edificações, vegetação e corpos de água. O ponto é apresentado na Figura 17 e se localiza na célula 95x44 da grade do modelo. As comparações levaram em conta os dados de temperatura do ar e umidade relativa e são apresentadas posteriormente nos resultados.

Figura 17 - Ponto de comparação entre Dados Climáticos e ENVI-met



Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

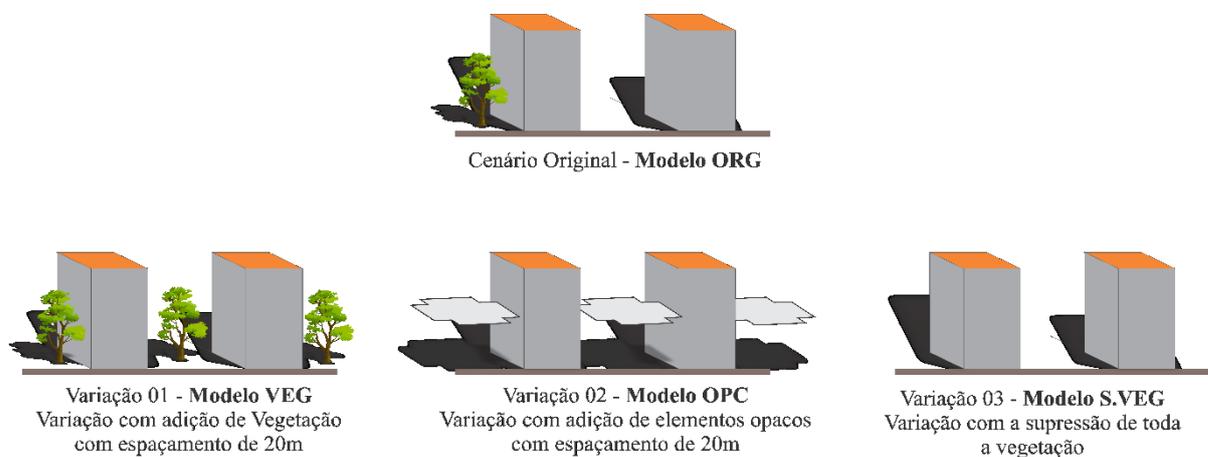
Detommaso, Costanzo e Nocera (2021) expõem que embora a maior parte dos estudos contam com uma validação dos dados de entrada, há alguns estudos recentes como de Sözen e Koçlar Oral (2019) que usaram diferentes modelos de cânions urbanos, O'Malley et al. (2015) que investigaram diferentes formas de mitigação para o fenômeno de ilhas urbanas de calor, Rui et al. (2018) que pesquisaram a relação entre quantidade de vegetação, conforto térmico e qualidade do ar de acordo com diferentes cenários de relação de cobertura verde, Li et al. (2019) que analisaram os desempenhos de resfriamento e economia de energia de diferentes projetos de paredes verdes e Gaspari, Fabbri e Lucchi (2018) que utilizaram um modelo para apoiar as decisões na escolha de soluções alternativas de design com diferentes elementos verdes, mas sem qualquer uso de dados experimentais para fins de calibração. Esses estudos não usaram validações, visto que o objetivo em comum é analisar a diferença entre cenários hipotéticos.

Ressalta-se que não foi possível fazer medições *in loco* por limitações referentes ao COVID-19, alterando a forma de funcionamento dos laboratórios da universidade e restringindo o acesso. Dessa forma, os resultados são expostos e foram analisados sem alterações, a fim de se entender a variação de cenários hipotéticos com diferentes configurações.

### 3.4 VARIAÇÃO DOS MODELOS

Os cenários foram configurados em quatro modelos, como esquema da Figura 18. O Cenário Original – Modelo ORG é o que busca a aproximação com o cenário real; a Variação 01 – Modelo VEG, que conta com a adição de vegetação nas ruas, espaçadas a cada 20m do ponto central de cada árvore; a Variação 02 – Modelo OPC, que substitui a vegetação inserida na primeira variação por um elemento de sombreamento opaco e; a Variação 03 – Modelo S.VEG, possui a supressão de toda a vegetação presente do modelo original.

Figura 18 - Tipo de Modelos



Fonte: Elaborado pelo autor

A vegetação existente no Modelo ORG foi mantida nas variações 01 e 02, Modelo VEG e Modelo OPC. Esse primeiro modelo (Modelo ORG) serviu para comparação e identificação do potencial de mudança das duas formas de sombreamento e buscou, através das simplificações, se aproximar das características da área analisada.

A cobertura do solo da área no Modelo ORG é 37,8% de área construída, 23,2% de pavimentação de pedra, 16,2% de pavimentação em paver e placas cimentícias, 16,2% de asfalto, 2,4% de piso de madeira, 0,7% de fontes de água e 4,2% em solo com vegetação de porte baixa como cobertura do solo.

Para o solo foram configurados cinco tipos; o asfalto; o pavimento de concreto claro que abrange revestimentos em piso de concreto bruto e placas cimentícias; o pavimento de concreto escuro, que representa o paver e concretos com mais tempo de uso e mais escuros; pedra, representando revestimentos em pedras, granitos em formato de paralelepípedos;

madeira, presente no novo Largo da Alfândega; além de terra para solos descobertos e grama. As fontes de água presente no Largo da Alfândega foram configuradas com o material padrão do software, alterando a profundidade para 1,5m. Foram usadas as temperaturas e porcentagem de umidade do solo padrão do software.

No Modelo VEG, a Rua Felipe Shimidt, Rua Conselheiro Mafra, Rua do Largo da Alfândega, Rua Deodoro, Rua Trajano e Avenida Paulo Fontes tem a adição de árvores do modelo representativo a cada 20m do ponto central como mostra a Figura 19. O percentual de vegetação existente era de 3,8%, tanto para o Modelo VEG, quanto para o Modelo OPC, o percentual de adição de sombreamento foi de 8,57% da área de cobertura total da área de análise. O distanciamento é apontado por Abreu-Harbich, Labaki e Matzarakis (2015) que expõem que os agrupamentos de árvores podem aumentar os efeitos de resfriamento de uma árvore, no entanto, é importante observar como a formação de árvores pode promover uma grande área de sombra, especialmente para aglomerados alinhados. Para um sombreamento eficaz de árvores ao longo de uma rua, a distância entre as árvores deve ser relativa ao diâmetro da copa. Com esse espaçamento a ventilação não fica comprometida.

A intenção é criar um cenário hipotético que possa ter ações de mitigação no calor urbano e uma melhor percepção térmica pelo pedestre, o maior usuário desse espaço para ser comparado com a segunda variação. As características desejadas de modelagem para esse estudo são de vegetação arbórea sem raízes agressivas, índice alergênico baixo, porte médio e caducifólia. Serão modeladas árvores de caráter simplificado para que se possa entender o potencial de influência no índice de estresse térmico.

Figura 19 - Locação de árvores do modelo representativo para o Modelo VEG



Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

Não há uma espécie de vegetação a ser recomendada, uma vez que a repetição da mesma espécie pode trazer a presença de fungos e parasitas. Adam (2001) indica uma frequência já existente na área central Florianópolis de 3 espécies arbóreas principais, *Largestroemia indica*, conhecida como Extremosa, *Ligustrum lucidum*, comumente chamado de Ligustro e *Terminalia catappa*, popularmente conhecida como Amendoira da Praia. Ressalta que na hora da escolha, deve-se levar em consideração os objetivos para cada projeto de arborização. A vegetação inserida, como já mencionado anteriormente, tem características de uma Amendoira da Praia (Figura 20), perdendo parte de sua folhagem nos períodos do inverno, possibilitando uma incidência solar maior. A árvore é tolerante a ventos fortes, névoa salina e salinidade moderadamente alta na zona da raiz. Cresce principalmente em solos arenosos bem drenados e arejados (PINZI et al., 2009).

Figura 20 - Uso em meio urbano de *Terminalia catappa*, Rio de Janeiro - RJ



Fonte: Imagem extraída do site [www.biologiadapaisagem.com.br](http://www.biologiadapaisagem.com.br)

Já no Modelo OPC, na segunda variação, é mantida a vegetação existente, mas a vegetação inserida na primeira variação é alterada para o elemento de sombra opaco, o qual tem a mesma proporção em área da copa da árvore do modelo representativo, ficando na altura de 6m, como é apresentado na Figura 21. O objetivo dessa variação é entender quais são as diferenças entre os tipos de sombreamento, visto que são equivalentes em área de cobertura aos da primeira variação.

Figura 21 - Localização dos elementos de sombra para o Modelo V2S20m



Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

Para a configuração do material utilizado para a variação do modelo original, que simulou a mesma área de sombreamento, foi utilizado o material PVC no banco de dados do ENVI-met, alterando os dados de absorção para 0,2 e de reflexão para 0,8, também baseado na ABNT NBR 15220-2 (2005b), buscando um material com baixa densidade e aproximando do valor de materiais plásticos como poliésteres, almejando simular uma tenda que tenha a mesma área de sombreamento da árvore base.

O Modelo S.VEG propõe a retirada de toda a vegetação existente no Modelo ORG, tanto árvores como gramados. Exemplificando uma supressão hipotética, deixando o ambiente com mais área em concreto e sem o sombreamento proporcionado pela vegetação existente. O percentual que antes era de 3,8%, fica nulo nessa variação.

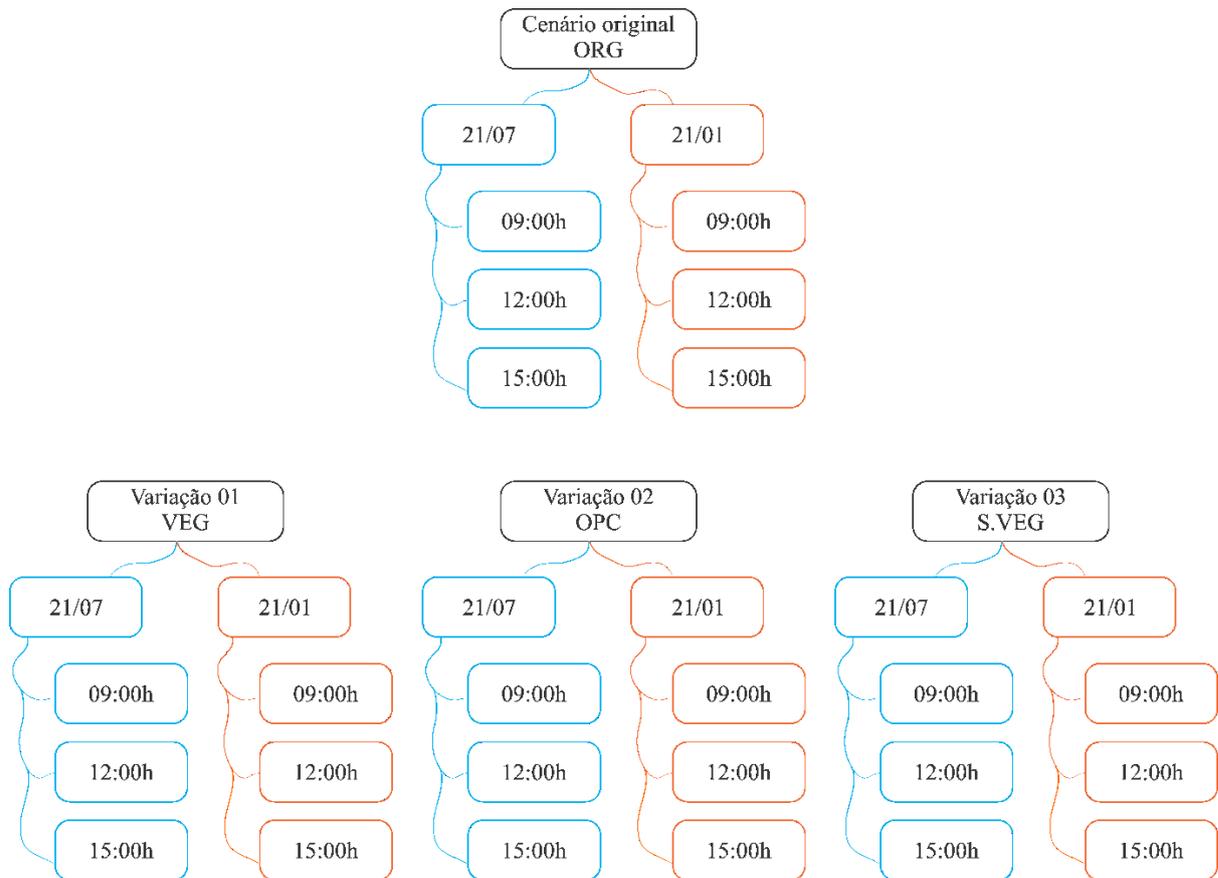
Para o processo de modelagem foi definido um usuário para que fosse possível extrair dados dos índices de conforto. As variáveis humanas como idade, gênero, peso, altura, metabolismo e vestimentas também foram configuradas, criando um usuário padrão simplificado. Foram utilizados os dados do usuário padrão do software para cálculo que são: idade de 35 anos, altura de 1,75 m e peso de 75 kg e taxa metabólica de 80 W e *clo* de 0,90, baseados na ISO 7730.

### 3.5 PERÍODO DE SIMULAÇÃO

Tendo em vista que o tempo necessário para simulação é longo, o período de simulação se dará em dois momentos principais, um dia típico com altas temperaturas e outro com temperaturas mais amenas. Em cada um desses dias serão analisados três horários do dia, um iniciando pela manhã às 9:00h, outro às 12:00h e outro à tarde, às 15:00h, por representarem horários de fluxo maior de pedestres e também horários críticos para a temperatura. A definição desses dias típicos de projeto foi baseada em dados que foram compilados em um arquivo *.idf*, *design\_days\_Brasil\_2,5%* (LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES/UFSC, 2006), desenvolvido pelo LABEE/UFSC usando o mesmo arquivo climático *.TRY* e baseados nos estudos de Goulart (1993), fundamentada no método Americano e Canadense (ASHRAE), o qual foi analisado por meio estatístico os dados de temperatura do ar, umidade do ar, velocidade e orientação do vento com níveis de ocorrência e frequências. Adotando assim, o dia 21 de janeiro e o dia 21 de julho para representarem os dias de altas e baixas temperaturas respectivamente.

Conforme Wang Akbari (2016), o momento ideal para que o processo de simulação seja iniciado é à noite ou ao nascer do sol, para que a simulação possa seguir os processos atmosféricos de maneira completa dentro do software. Para se obter uma estabilização da simulação do software, a simulação se iniciou às 6 horas da manhã do dia anterior ao período analisado, considerando um período de adaptação do microclima, totalizando 35 horas para cada simulação. Na Figura 22 é apresentado um esquema dos horários de análise para cada modelo. Para cada dia e modelo simulado, foram necessárias entre 50 a 55 horas de simulação.

Figura 22 - Fluxograma de horários de análise



### 3.6 ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO UTILIZADO E CALIBRAÇÃO

Diferente dos demais índices, somente PET e UTCI foram desenvolvidos especificamente para ambientes externos, embora ainda seja válido o uso dos outros índices adaptando-os às variáveis externas. Vendo do ponto de vista do software ENVI-met, o índice PET também é o mais indicado para a análise de conforto entre os índices ofertados, entretanto, os disponíveis para simulação são PET, PMV/PPD, UTCI e SET. Conforme Johansson e Emmanuel (2006), os índices PMV/PPD e SET são baseados em equações de equilíbrio de calor do corpo em estado estacionário, não sendo aconselhados ao ambiente externo, onde as variações temporais e espaciais são grandes. PET, quando comparado ao PMV, se demonstra mais abrangente em termos de contabilização de parâmetros fisiológicos reais e fluxo de calor (MAYER; HÖPPE, 1987).

Dentre os índices disponíveis e comparando seus pontos positivos e negativos, o selecionado para se determinar o efeito dos diferentes cenários da pesquisa foi o índice PET. Como já explanado, um dos índices com maior difusão em estudos recentes, possibilitando assim a comparação entre eles entre vários tipos de clima mundial.

As faixas de percepções térmicas não são definidas no PET original, Matzarakis, e Mayer (1996) apresentam uma calibração apoiada no modelo de PMV, mas ressaltam que a calibração deve ser feita para cada tipo de clima. A avaliação feita pelos autores entre os dois índices, percepção térmica e grau de estresse psicológico são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - PMV e PET, Percepção térmica e Grau de estresse psicológico

PMV	PET	Percepção térmica	Grau de estresse psicológico
		Muito frio	Extremo estresse de frio
-3.5	4 °C	-----	-----
		Frio	Forte estresse de frio
-2.5	8 °C	-----	-----
		Pouco frio	Moderado estresse de frio
-1.5	13 °C	-----	-----
		Ligeiramente Frio	Leve estresse de frio
-0.5	18 °C	-----	-----
		Confortável	Não há estresse térmico
0.5	23 °C	-----	-----
		Ligeiramente calor	Leve estresse de calor
1.5	29 °C	-----	-----
		Pouco calor	Moderado estresse de calor
2.5	35 °C	-----	-----
		Calor	Forte estresse de calor
3.5	41 °C	-----	-----
		Muito calor	Extremo estresse de calor

Fonte: Adaptado de (MATZARAKIS; MAYER, 1996)

Para as análises foi utilizada a calibração feita para a cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, a qual tem a mesma classificação climática que Florianópolis por Köppen como Cfa (KOTTEK et al., 2006). Gobo, Galvani e Wollmann (2018) definem para a cidade de Santa Maria a faixa de conforto térmico com escala PET através de análise de regressão linear múltipla com limite superior em 24°C, equivalente à 23°C em PET original e limite inferior em 16°C, equivalente à 18°C em PET original. A Tabela 5 apresenta o PET calibrado para Santa Maria, com clima Cfa.

**Tabela 5 - PET Calibrado para o clima Cfa**

PET Calibrado	Percepção térmica
<5°C	Muito frio
5 – 11°C	Frio
11 - 16°C	Pouco frio
16 - 24°C	Nem frio nem quente
24 - 30°C	Pouco quente
30 - 39°C	Quente
> 39°C	Muito quente

Fonte: Adaptado de (GOBO; GALVANI; WOLLMANN, 2018)

A calibração feita por Gobo, Galvani e Wollmann (2018) foi com base na aplicação de questionários de percepção/sensação aos habitantes e, ao mesmo tempo, registrando dados de atributos meteorológicos. As pessoas foram entrevistadas por meio de questionário adaptado do modelo estabelecido pela ISO 10551.

### 3.7 TRATAMENTO DOS DADOS DE SAÍDA

O módulo *Biomet* foi utilizado para processamento de dados e geração dos resultados. Os dados de saída foram analisados e tratados com o plug-in acoplado ao ENVI-met *Leonardo*, que possibilita fazer a análise e representações dos efeitos proporcionados pelos elementos nas simulações. Foram analisados os parâmetros de temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do ar, temperatura média radiante, bem como o índice de conforto PET. Esses resultados são apresentados em um sistema de mapas gráficos, com valores em escala, diferentemente se fossem feitos de forma experimental em pontos localizados específicos. Os valores de  $T_{mrt}$  e PET são apresentados em planta e em corte.

Para as variáveis analisadas, serão apresentados os resultados de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do ar do Modelo ORG para os três horários dos dias 21/01 e 21/07. Após são apresentadas as comparações das variáveis de temperatura média radiante e índice de conforto PET para as três variações com o Modelo ORG, (Modelo VEG, Modelo OPC, Modelo S.VEG) também para os mesmos períodos. O termo temperatura potencial do ar, apresentado pelo plug-in *Leonardo* representa a temperatura do ar, que na versão atual 4.4.6, é calculada junto com a pressão do ar padrão de 1013 hPa.

## 4 RESULTADOS

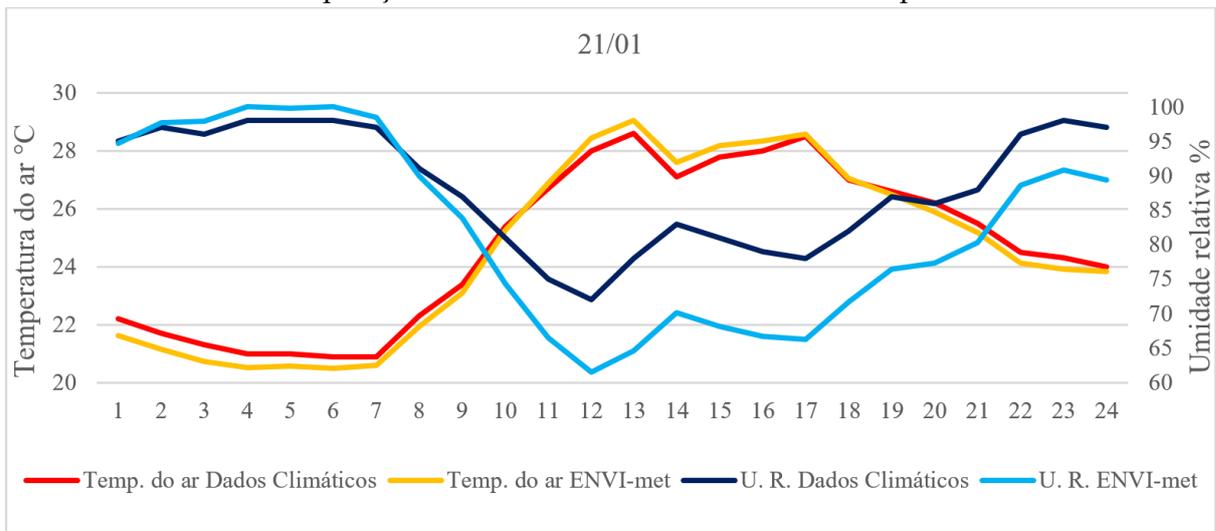
Com esse estudo foi possível entender a influência dos elementos de sombra opacos e vegetados e como esse processo interfere na percepção do estresse térmico em ambientes externos pelo pedestre, contribuindo para o estudo das condições de conforto térmico no campo do microclima urbano. A seguir são apresentados os resultados em relação aos dados climáticos da estação meteorológica, a caracterização do Modelo ORG para temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do ar e ao fim, são apresentados os resultados em relação à temperatura radiante média e ao índice PET para os períodos analisados.

### 4.1 DADOS CLIMÁTICOS INSERIDOS E RESULTADOS DO SOFTWARE

Para os dois dias de análise, foram simulados e extraídos os resultados na altura de 1,5m, buscando proximidade com os valores de medição da estação meteorológica.

Para o dia 21 de janeiro, podemos visualizar pelo Gráfico 5, que as temperaturas do ar nos resultados do ENVI-met se mantiveram muito próximas dos dados de entrada utilizados. No entanto, houve uma diferença a partir das oito horas da manhã, no dia 21/01, para os valores de umidade relativa. Liu, Zheng e Zhao (2018) afirmam que o ENVI-met tende a subestimar a umidade do ar e superestimar a temperatura do ar em um clima subtropical quente e úmido no verão. Outro fator que pode ter gerado essa diferença entre a umidade relativa, pode ser explicada por influências dos elementos do modelo, uma vez que a estação meteorológica é mais isolada em sua locação.

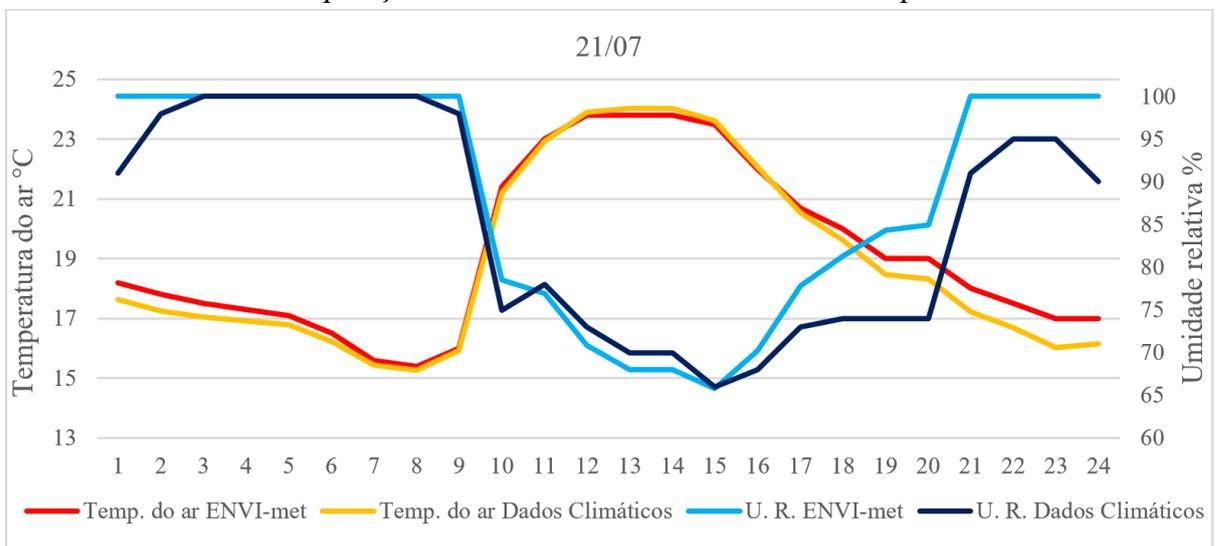
Gráfico 5 - Comparação entre Dados climáticos e ENVI-met para o dia 21/01



Fonte: Dados de (INMET, 2018) e ENVI-met.

Já para o período simulado para o dia 21 de julho, as temperaturas do ar se mantiveram mais constantes até às 15 horas, já a umidade relativa do ar apresentou variações a partir desse período da tarde, podemos visualizá-las no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Comparação entre Dados climáticos e ENVI-met para o dia 21/07



Fonte: Dados de (INMET, 2018) e ENVI-met.

Nesse contexto, os resultados obtidos vêm ao encontro com estudos apresentados por Yang et al. (2013) e Lee, Mayer e Chen (2016) com estudos aplicados ao clima da Alemanha, que apontam que os resultados obtidos com o ENVI-met subestimou a umidade do ar enquanto superestimou a temperatura do ar, apontando as limitações com a radiação solar de entrada. Gál

e Kántor (2020) em seus estudos na cidade de Szeged, na Hungria, também indicam que o ENVI-met tende a superestimar a temperatura média radiante durante períodos prolongados de sombra e subestimar quando os locais são iluminados pelo sol.

## 4.2 CENÁRIO ORIGINAL - MODELO ORG

Os dados de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do ar do Modelo ORG são apresentados a seguir para que seja possível entender esses parâmetros climatológicos da área analisada. A Rua Felipe Schimidt, a Avenida Paulo Fontes, a Rua Jerônimo Coelho e a Rua Arcipreste Paiva são as ruas que se localizam nas bordas do modelo simulacional, os valores ali representados, podem não representar a realidade uma vez que o software precisa desse espaço limite para cálculo de ambientação do modelo.

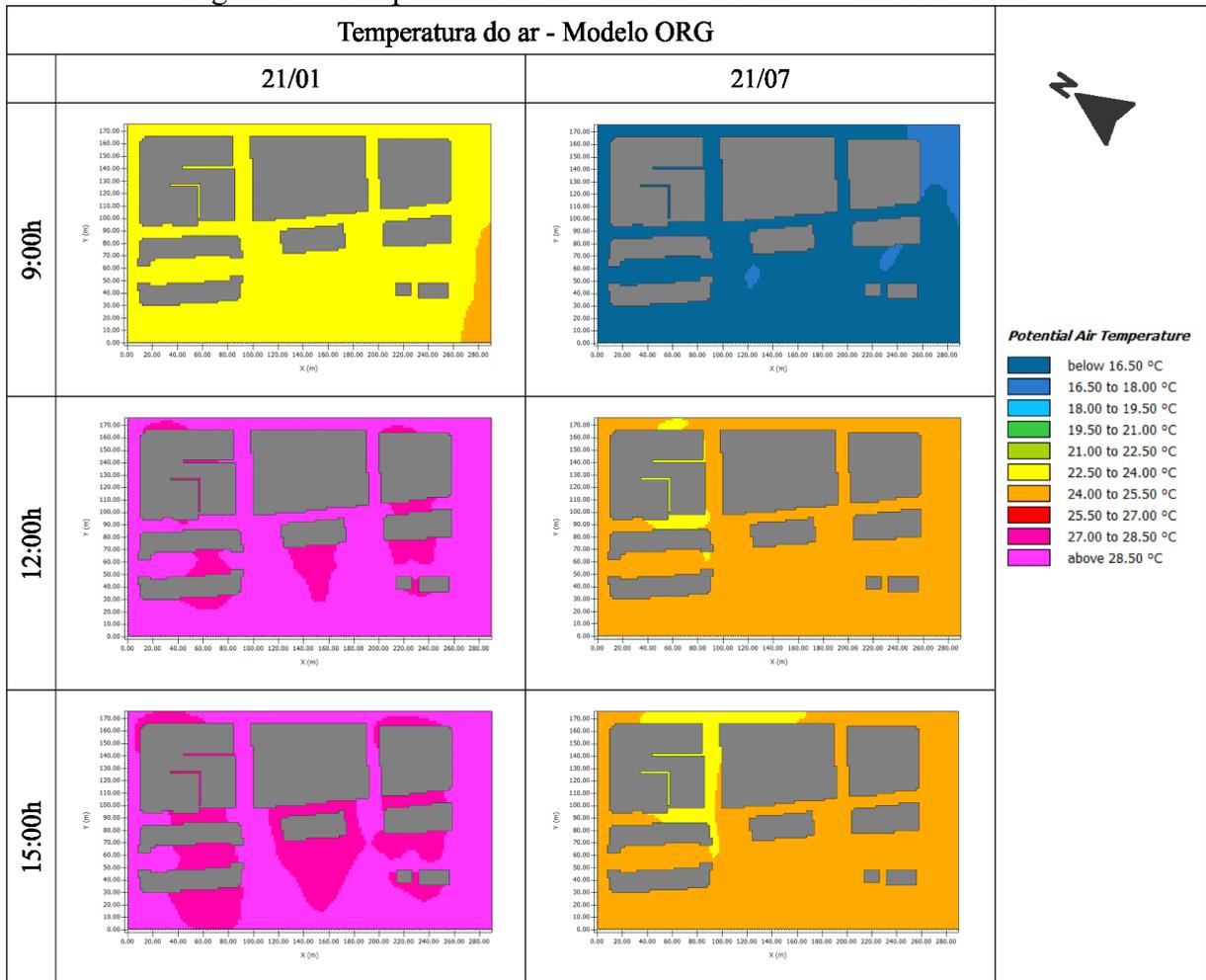
### 4.2.1 Temperatura do ar – Modelo ORG

Como é possível acompanhar pelos mapas à esquerda da Figura 23, para o dia 21/01, no primeiro horário analisado, às 9:00h, as temperaturas se mantiveram entre 22,9 a 24,4°C. Já para o período do horário de 12:00h, as temperaturas passam a ficar entre 27,9 a 31,6°C. O período da tarde, às 15:00h, ainda mantém temperaturas entre 27,8 a 30,8°C. Isso representa uma amplitude térmica na temperatura do ar de 8,7°C entre os horários analisados no mês de janeiro.

Já para o período do dia 21/07, apresentado à direita na mesma figura, as temperaturas do ar para o período da manhã, às 9:00h, se mantém entre 15,8 a 16,9°C, no período do meio-dia apresentou temperaturas entre 23,4 a 25,3°C, já para o período da tarde, às 15:00h, se manteve entre 23,3 a 25°C.

Nos dois dias analisados a temperatura do ar, nos períodos da manhã, se mantém mais amenas, apresentando uma menor variação entre os períodos do meio-dia e da tarde. É possível notar que a variação de temperatura acontece próxima às edificações, como na Rua Deodoro e também onde já existe vegetação arbórea, no Largo da Alfândega e na parte mais alta da rua Arcipreste Paiva.

Figura 23 - Temperatura do ar - dias 21/01 e 21/07 - Modelo ORG

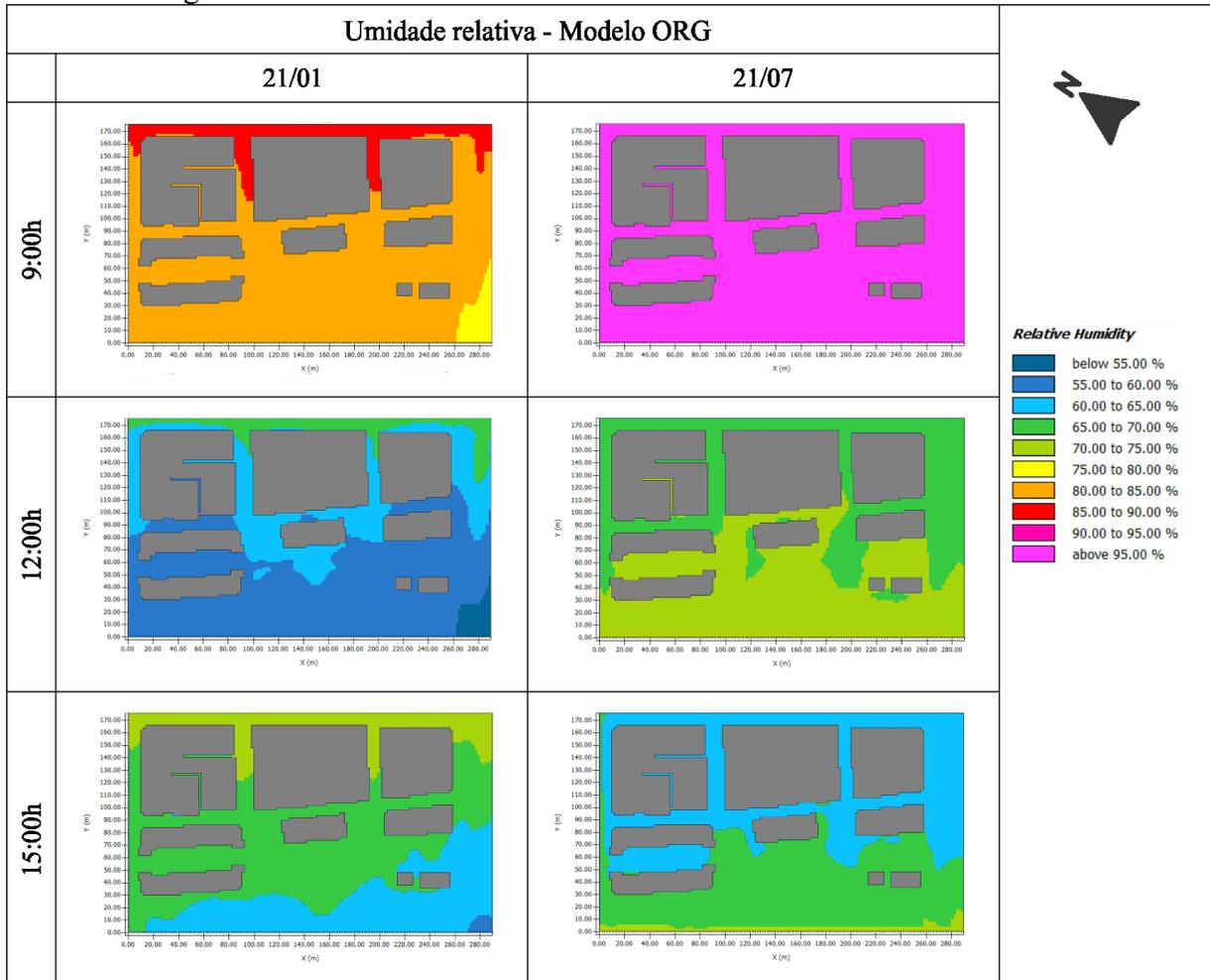


Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

#### 4.2.2 Umidade relativa – Modelo ORG

A umidade relativa no Modelo ORG, para os três horários dos dias 21/01 e 21/07, são apresentados na Figura 24. Para o dia 21/01, no período da manhã os valores indicaram uma umidade relativa entre 78,3 e 85,9%. Para o horário das 12:00h, os valores ficaram entre 52,2 a 66,6% e para o horário das 15:00h, os valores se mantiveram mais estáveis em relação ao meio-dia, ficando entre 59,3 e 72,7%. Para o dia 21/07, no primeiro período do dia, às 9:00h, a umidade relativa ultrapassa os 95%, para o período do meio-dia, se mantém entre 65 a 75%, já para o período da tarde, apresenta valores entre 60 a 75%.

Figura 24 - Umidade relativa do ar - dias 21/01 e 21/07 - Modelo ORG



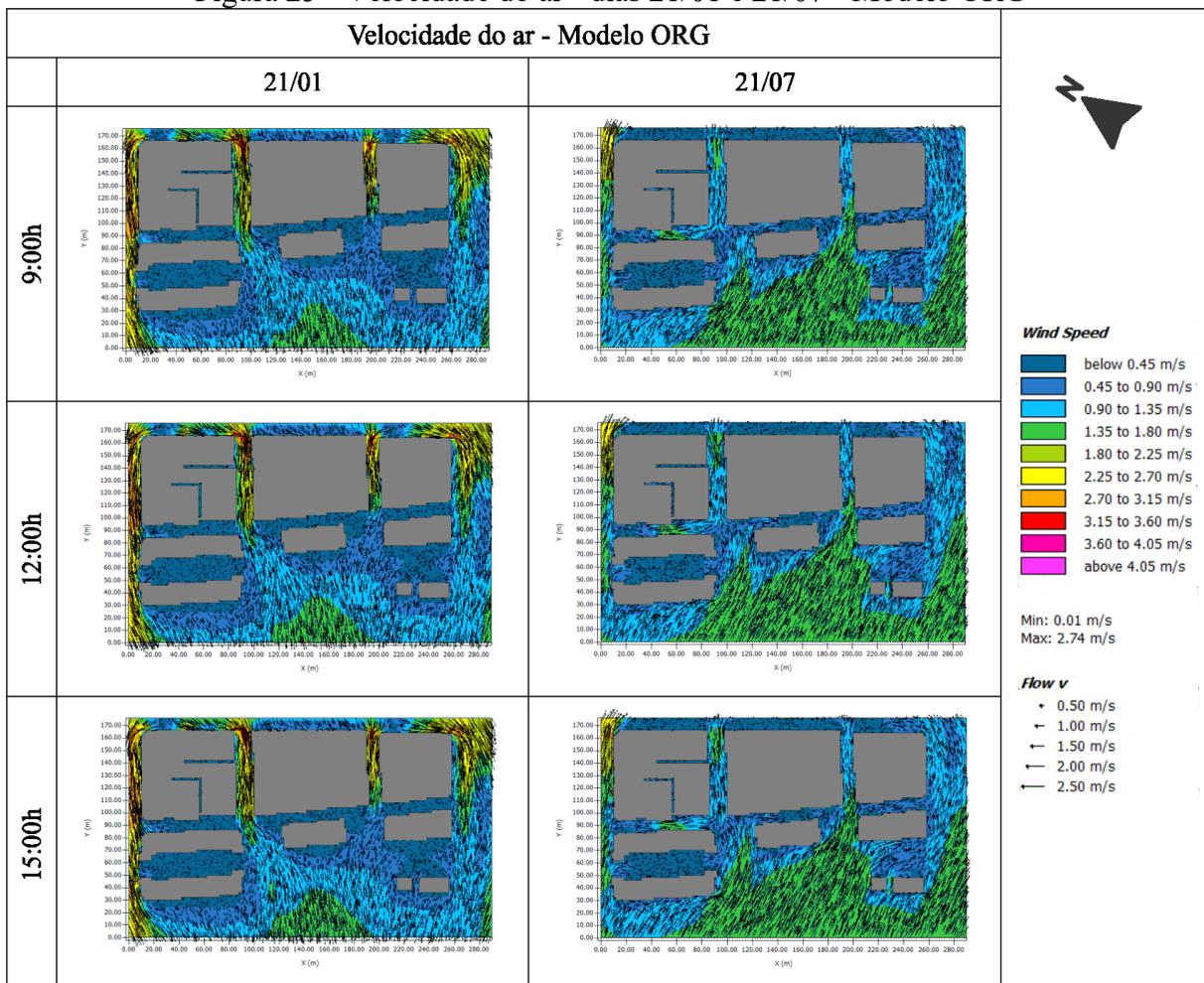
Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Como já apontado por Javadi (2021), a faixa aceitável de umidade relativa está geralmente entre 30% e 70%, a umidade relativa de 50% é considerada um valor ideal, no entanto é necessário analisá-la em conjunto com outras variáveis como temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento. Para os horários analisados no mês de julho e janeiro, os valores do período da manhã dos dois dias expressaram valores que ultrapassaram essa média, chegando a ficar entre 78,3 a 85,91% no dia 21/01 e mais que 95% no dia 21/07, considerando assim um nível de alta umidade do ar. Essa umidade vai diminuindo gradualmente com a variação da radiação solar durante o dia. Conforme Jim e Peng (2012), durante a noite o ar externo atinge baixas temperaturas que, inversamente, causam o aumento da umidade relativa em até 100%, reduzindo assim o processo de evapotranspiração da vegetação. Ao contrário, durante o dia, a temperatura do ar mais elevada induz uma queda da umidade relativa, permitindo que o processo de evaporação ocorra. O excesso de evapotranspiração das plantas aumenta o nível de umidade relativa do ar, podendo causar sensação de abafamento.

### 4.2.3 Velocidade do ar – Modelo ORG

Em relação à ventilação, é apontado que ela pode influenciar na taxa de suor do pedestre e com base nos estudos de Penwarden (1973), sobre a força mecânica do vento, a velocidade média do vento de cerca de 5m/s é o limite inicial de condições desconfortáveis. Todos os horários analisados para os dois dias se mantiveram abaixo desse limite. Os mapas gráficos são exibidos na Figura 25. Para o dia 21/01, a velocidade se manteve abaixo de 3,5m/s, nesse dia, a velocidade utilizada para o forçamento simples do software foi de 4m/s, já para o dia 21/01 foi de 3m/s. É possível observar que no dia 21/01, com orientação do vento a 20°, as edificações que se localizam entre as ruas Felipe Schmidt e Conselheiro Mafra bloqueiam boa parte da ventilação, causando direcionamento para as ruas centrais no sentido vertical do mapa, Rua Deodoro e Rua Trajano, assim como para as ruas das bordas do mapa, Rua Jerônimo Coelho e Rua Arcipreste Paiva . Para o dia 21/07, a orientação foi de 240°, onde é possível observar uma maior velocidade do ar na área central do Largo da Alfândega, não apresentando bloqueamento pela Avenida Paulo Fontes. Com a vegetação existente não é possível identificar direcionamento da movimentação de ar, uma vez que o plantio é pontual e a altura de corte dos mapas é na altura do pedestre, de 1,5m e as copas das árvores ficam em altura superior a 6m.

Figura 25 - Velocidade do ar - dias 21/01 e 21/07 - Modelo ORG



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

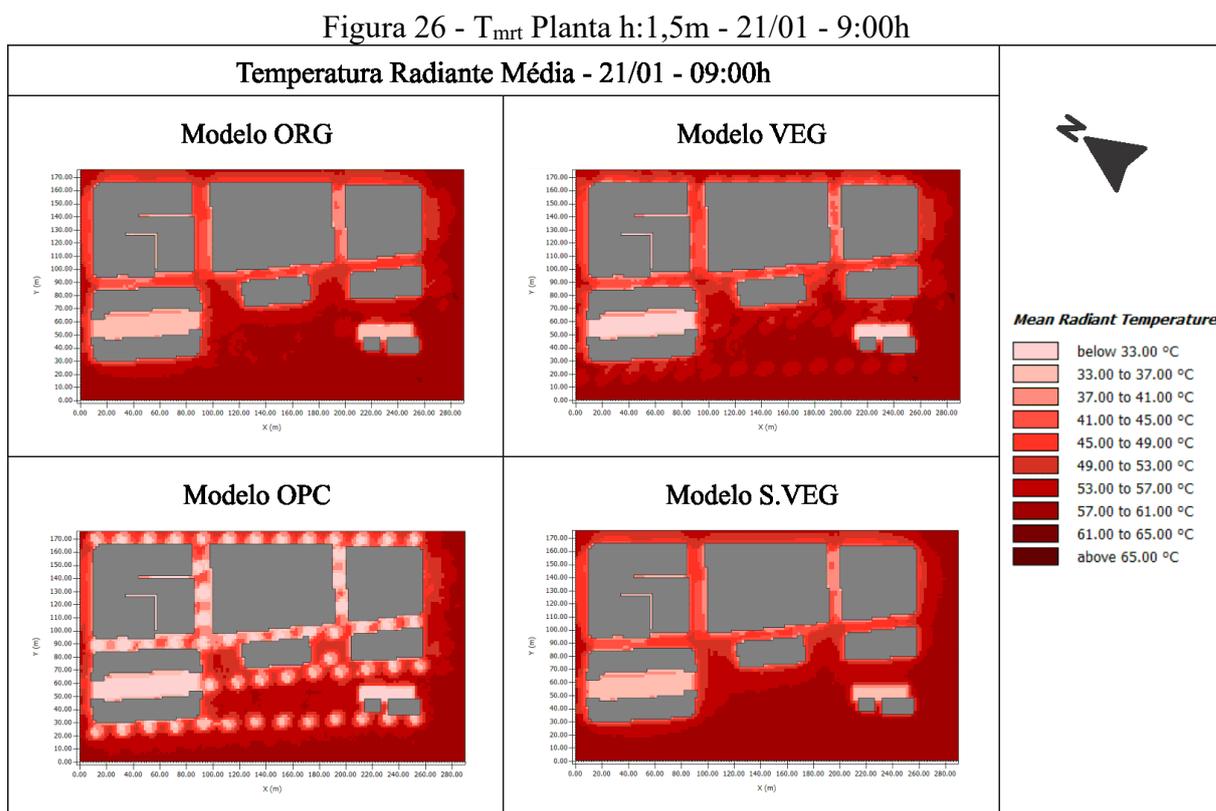
As edificações têm influência na ventilação, no entanto, a vegetação pode ser utilizada para auxiliar parte do direcionamento do ar e o plantio pode ser otimizado para se evitar que a ventilação fique prejudicada, característica também apontada por Erlwein, Zölch e Pauleit (2021), Zhao, Sailor e Wentz (2018) e Zheng, Zhao e Li (2016).

### 4.3 TEMPERATURA RADIANTE MÉDIA

A temperatura média radiante, como já apontado, é o fator que mais influencia os resultados de sensação de conforto ou estresse térmico do pedestre. A seguir serão apresentados os resultados para os dois dias analisados com seus respectivos horários.

### 4.3.1 Temperatura Radiante Média – 21 de janeiro

Os resultados para o período das 9:00h da manhã, para o dia 21/01, são apresentados na Figura 26, os mapas expõem dados do Modelo ORG e suas 3 variações, Modelo VEG, Modelo OPC e Modelo S.VEG.



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

No Modelo ORG, os resultados apresentaram valores que se mantiveram entre 32,8 a 61,2°C, com valores menores próximos às edificações. É notado também pontos em que a vegetação existente mantém os valores um pouco mais baixos, em torno de 53 a 57°C, localizados com a vegetação existente no Largo da Alfândega e na parte superior da Rua Arcipreste Paiva.

No Modelo VEG as temperaturas radiantes médias marcaram valores entre 32,3 a 61,4°C. Nesse modelo é visível o efeito que o sombreamento que as copas das árvores produzem, mantendo os valores entre 53 a 57°C na Avenida Paulo Fontes e na parte de cima do Largo da Alfândega. A Rua Deodoro e a Rua Trajano não apresentam grandes mudanças em relação ao Modelo ORG, isso pode ser explicado por essas áreas já serem sombreadas pelas edificações. No ponto próximo ao Mercado Público, esquina da Rua Deodoro com a Rua

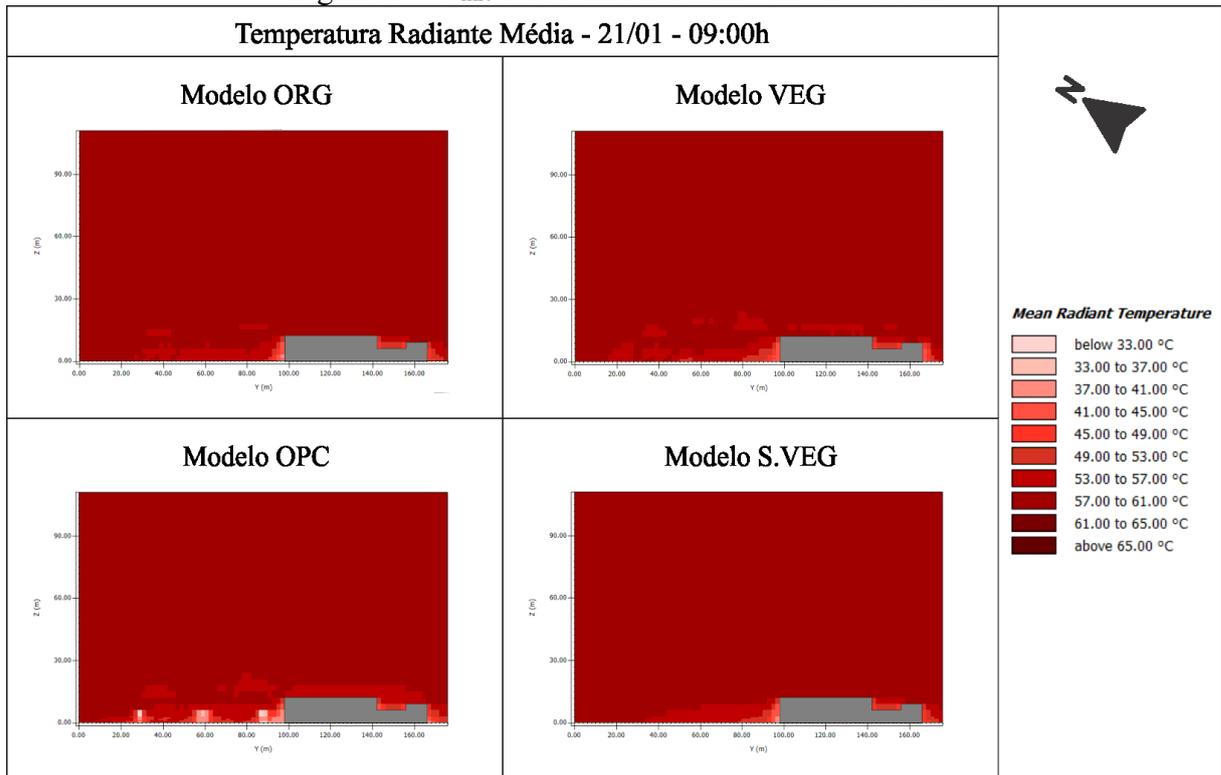
Conselheiro Mafra, também é notado uma diminuição dos valores, fazendo com que a área que antes apresentava valores entre 53 a 57°C agora apresentem valores de 49 a 53°C. É apontada também uma leve alteração na Rua Felipe Schimidt, no entanto, essa rua está bem próxima da borda do modelo.

Para a simulação com o Modelo OPC os valores se apresentaram entre 31,1 a 60,4°C. A área sombreada por esses elementos é bastante visível, marcando em toda a área a sua posição. Os valores abaixo do elemento de sombreamento opaco marcaram, gradativamente entre o ponto central até as bordas de cada elemento, valores de 31 a 45°C. A transmitância desse material é nula, evidenciando que a radiação solar tem grande influência sobre a  $T_{mrt}$ . Indo ao encontro com os estudos de Taha (1997) que afirma que a redução da temperatura da superfície também reduz a intensidade da radiação de ondas longas, diminuindo a temperatura do ar do ambiente local devido a menores fluxos de calor por convecção de superfícies mais frias.

Com o Modelo S.VEG, os valores ficaram entre 33,2 a 59,5°C, comparado ao Modelo ORG é notada a falta da vegetação, antes existente no espaço de convívio do Largo da Alfândega e também na parte superior da Rua Arcipreste Paiva. Em proporção visual, é o modelo que mais apresentou temperaturas acima de 57°C.

Entre o Modelo ORG e as suas variações, os valores mais altos são sempre vistos na Avenida Paulo Fontes e na Rua Arcipreste Paiva, explicado por seu material de cobertura do solo ser asfáltico.

Além da visualização desse efeito ao nível do pedestre, na altura de 1,5m, é interessante entender os efeitos que a inserção ou a supressão desses elementos causam no microclima urbano no eixo vertical. Na Figura 27 são apresentados os cortes no eixo x, com distanciamento 103m, para os quatro modelos para o horário da manhã, às 9:00h do dia 21/01.

Figura 27 -  $T_{mrt}$  Corte eixo x 103m - 21/01 - 9:00h

Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

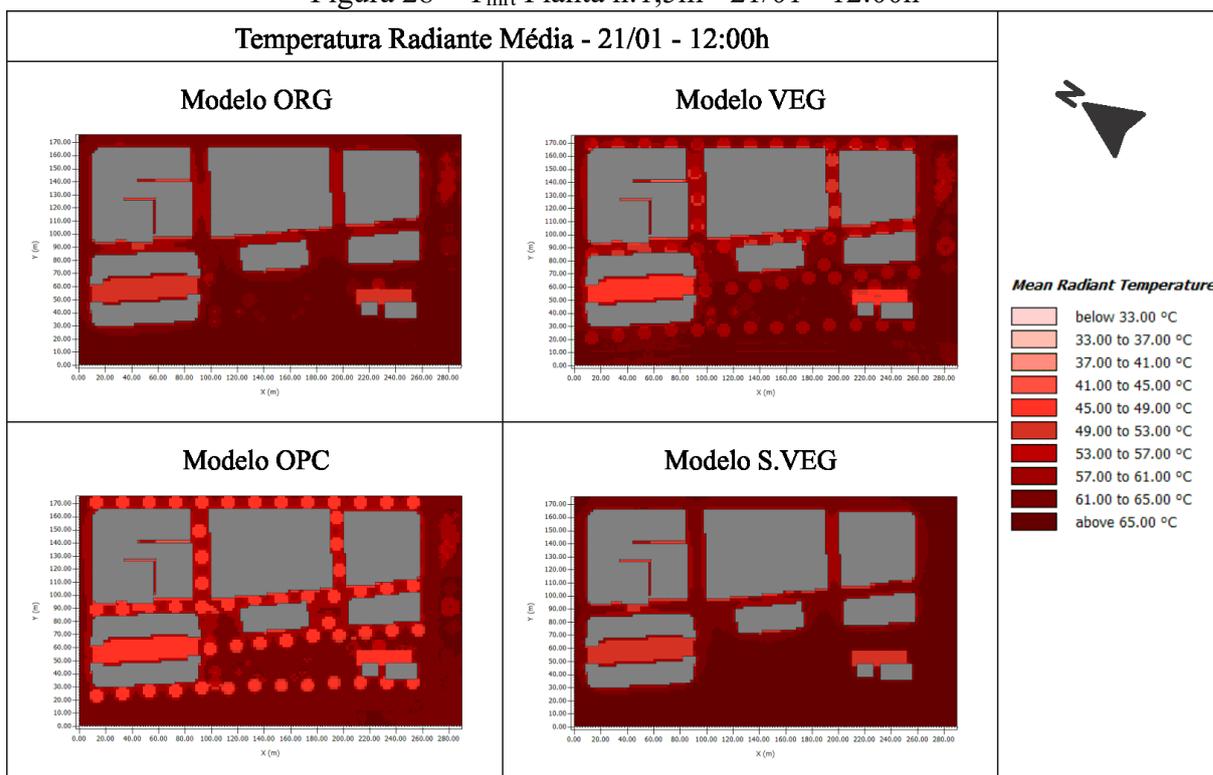
Com essa forma de visualização, é possível compreender a ação desses elementos entre as variações do Modelo ORG. No Modelo VEG é possível notar uma diminuição no canto inferior direito, onde se localiza a Avenida Paulo Fontes, ocasionada pelo ângulo de sombreamento da vegetação inserida, além de uma leve mudança entre a altura das copas das árvores, cerca de 20 a 25 metros, diminuindo a temperatura. Próximo ao ponto de 120m de distanciamento de  $y$ , é apresentada uma das edificações da Rua Deodoro em corte, também é notada uma leve diminuição dos valores acima da altura da edificação. Nesses dois pontos, os valores passam de 57 a 61°C para 49 a 57°C, isso se deve às vegetações inseridas também nessa via.

Para o Modelo OPC, é visível a diminuição expressiva logo abaixo do ponto central dos elementos de sombreamento opacos, na altura de 6m, onde foi proposto, passando de valores entre 49 a 53°C para até 33°C no ponto central e gradualmente aumentando para as bordas, chegando a 45 a 49°C. Esse modelo também apresentou mudança para níveis de alturas maiores, similar ao Modelo VEG e mais expressivo na Rua Deodoro, acima da altura do topo da edificação.

A supressão da vegetação no Modelo S.VEG é percebida nos locais de retirada das árvores, no Largo da Alfândega, aumentando consideravelmente a  $T_{mrt}$  nesse ponto.

As análises do período três horas depois, ao meio-dia, ainda do mesmo dia 21/01, são apresentadas na Figura 28. Nesse período foi possível analisar os elementos, depois de receberem radiação solar mais diretamente e por mais tempo que a análise anterior.

Figura 28 –  $T_{mrt}$  Planta h:1,5m - 21/01 - 12:00h



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Para o horário das 12:00h do dia 21/01, o Modelo ORG marcou valores de  $T_{mrt}$  entre 46,7 a 69,5°C, assim como no período da manhã, é possível observar valores inferiores nos pontos em que já existe vegetação, no Largo da Alfândega e ao norte da Rua Arcipreste Paiva.

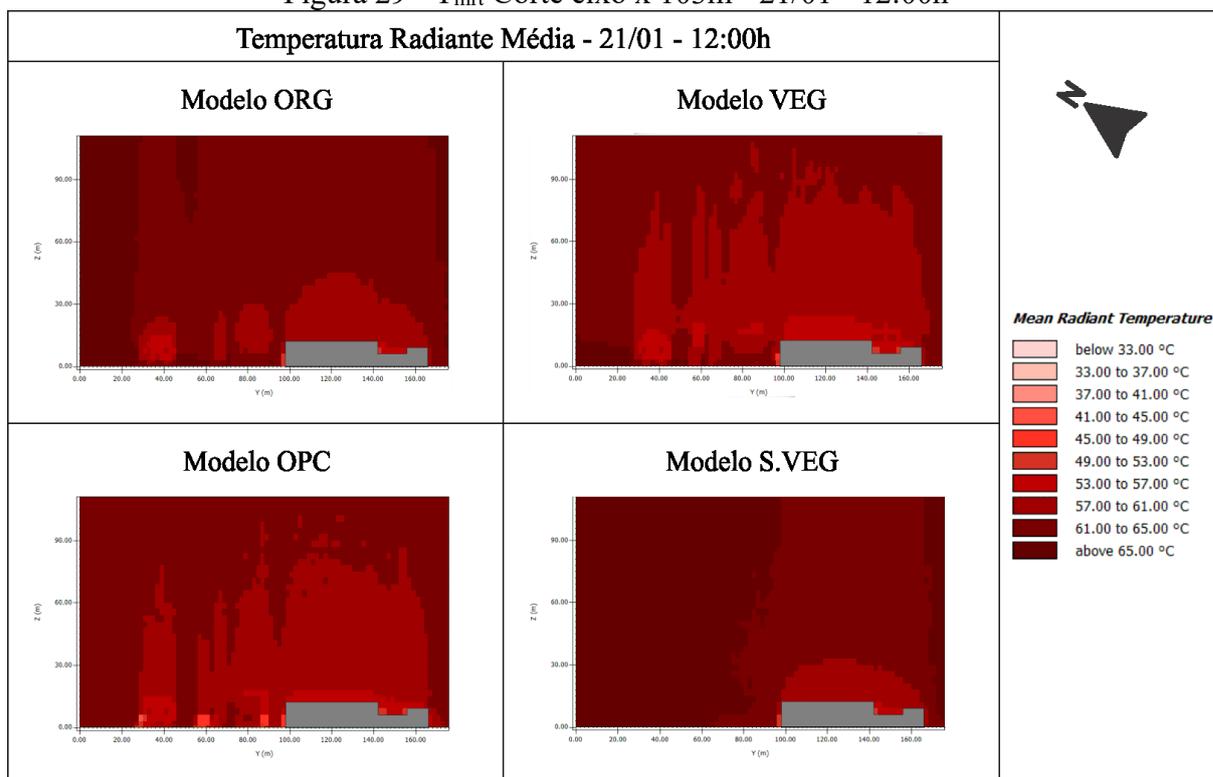
No Modelo VEG são notados os efeitos da vegetação arbórea adicionada, alterando a temperatura radiante média de valores acima de 65°C para 57 a 61°C, além do efeito da cobertura do solo nos canteiros da Avenida Paulo Fontes serem aumentados, uma vez que eles existem nos Modelos ORG, VEG e OPC, mas não conseguem diminuir a  $T_{mrt}$  sem essa vegetação inserida. Isso demonstra que as estratégias verdes são complementares umas às outras e podem ser potencializadas. Snir, Pearlmutter e Erell (2016) reforçam que a cobertura do solo por vegetação contribui para a diminuição da temperatura radiante e no albedo, sendo complementares à vegetação arbórea.

Para o Modelo OPC, a diminuição da  $T_{mrt}$  é mais evidente, marcando valores entre 43,6 a 67,5°C, conseguindo diminuir valores acima de 65°C para valores entre 45 a 49°C diretamente abaixo de todos os elementos de sombreamento opacos, além disso, diminui os valores do ambiente circundante, antes marcando acima de 65°C para valores entre 61 a 65°C. O efeito sobre as árvores existentes também é de diminuição de temperatura, sendo possível notar em todos os pontos de vegetação existentes no Modelo ORG.

Para o Modelo S.VEG há um aquecimento de forma geral, onde antes haviam as vegetações arbóreas no Modelo ORG a  $T_{mrt}$  aumentou, marcando valores acima de 65°C. Sustentando a hipótese de que a vegetação tem um papel fundamental no funcionamento do tecido urbano.

A exibição em corte nesse horário acontece na mesma posição do horário anterior, no eixo x a 103m. A Figura 29 permite visualizar os valores dos quatro modelos com a ação dos elementos.

Figura 29 -  $T_{mrt}$  Corte eixo x 103m - 21/01 - 12:00h



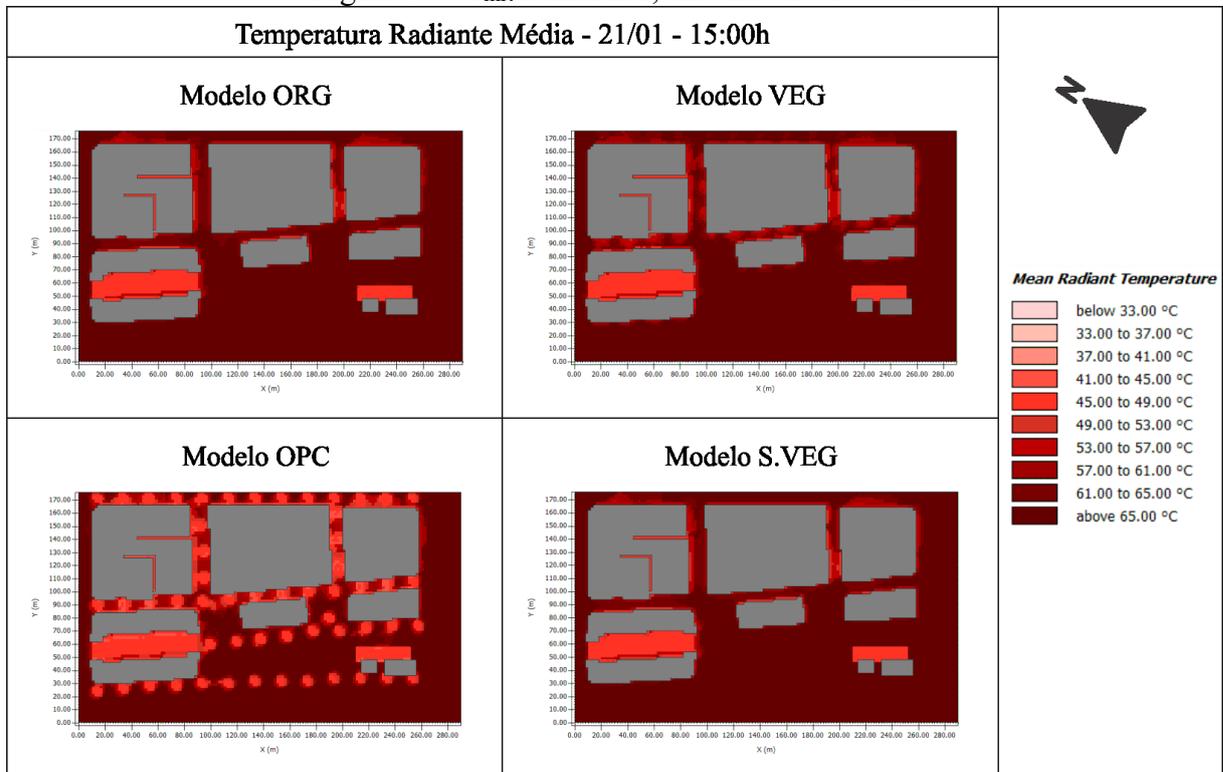
Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

No Modelo ORG é possível observar o efeito que as copas das árvores existentes produzem, diminuindo a  $T_{mrt}$  consideravelmente em níveis mais altos, de 20 a 50m de altura.

Em comparação com o Modelo VEG, o efeito da adição da vegetação também é notado na altura acima da copa das árvores. Diminuindo a  $T_{mrt}$ , antes com valores de 61 a 65°C para valores de 57 a 61°C. No Modelo VEG, notamos a constância dos valores altos no material de asfalto, na Avenida Paulo Fontes, passando de 65°C. Confirmando resultados de Feitosa et al. (2021), que aponta que superfícies com baixa refletância solar, apresentam superfícies mais quentes e tem influência nas zonas térmicas. Já no Modelo OPC, há uma diminuição nessa área em relação ao Modelo ORG, passando a marcar  $T_{mrt}$  entre 61 e 65°C. Novamente é notada uma maior diminuição da  $T_{mrt}$  logo abaixo do elemento de sombreamento opaco, no entanto o Modelo VEG tem maior influência em alturas acima do nível das copas. Com o Modelo S.VEG, é possível notar o aumento considerável da  $T_{mrt}$  nas áreas de supressão de vegetação, bem como aumento da  $T_{mrt}$  em níveis superiores. O sombreamento das edificações ainda influencia os valores de  $T_{mrt}$  acima do nível das edificações na Rua Deodoro. Explicando essa diminuição localizada.

Para o período da tarde, das 15h do dia 21/01, os mapas são apresentados na Figura 30. Foi o horário que apresentou os maiores valores de  $T_{mrt}$ .

Figura 30 -  $T_{mrt}$  Planta h:1,5m - 21/01 - 15:00h

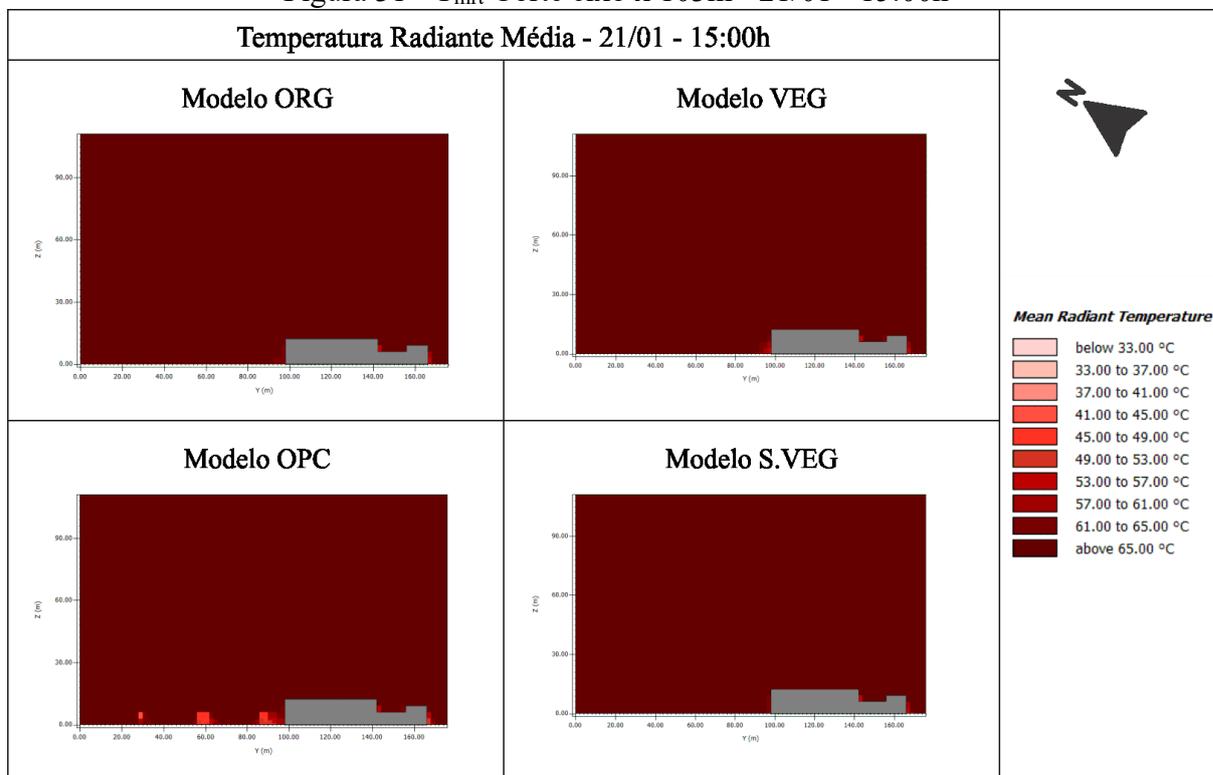


Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

No Modelo ORG para o horário do meio-dia há uma prevalência nos espaços abertos para valores de  $T_{mrt}$  acima de  $65^{\circ}\text{C}$ . São notados valores inferiores na Rua Deodoro e na Rua Trajano, explicados pelo sombreamento causado pelas edificações. Os valores no Modelo ORG alcançaram até  $79,9^{\circ}\text{C}$ . Para o Modelo VEG a vegetação adicionada em locais com proximidade às edificações tem um melhor desempenho para diminuição da  $T_{mrt}$ , com valores menores que o Modelo ORG, são eles a Rua Conselheiro Mafra, a Rua Deodoro e a Rua Trajano, diminuindo de valores acima de  $65^{\circ}\text{C}$  para  $57$  a  $61^{\circ}\text{C}$ . No Modelo OPC, os elementos de sombreamento opacos obtiveram melhor desempenho na diminuição da  $T_{mrt}$ , alcançando valores entre  $45$  a  $49^{\circ}\text{C}$  em todas as vias em que foram aplicados, onde antes estavam acima de  $65^{\circ}\text{C}$ . Ficando evidente a mudança que o sombreamento exerce, tendo forte relação com a  $T_{mrt}$ . No entanto, esse efeito é localizado somente abaixo de sua projeção, não se estendendo para o ambiente circundante. Não houve mudanças significativas para esse horário entre os modelos ORG e S.VEG para o nível do pedestre.

A Figura 31 apresenta o corte para o período da tarde, horário das 15:00h, para o dia 21/01, novamente na mesma posição de 103m de distanciamento no eixo y.

Figura 31 -  $T_{mrt}$  Corte eixo x 103m - 21/01 - 15:00h

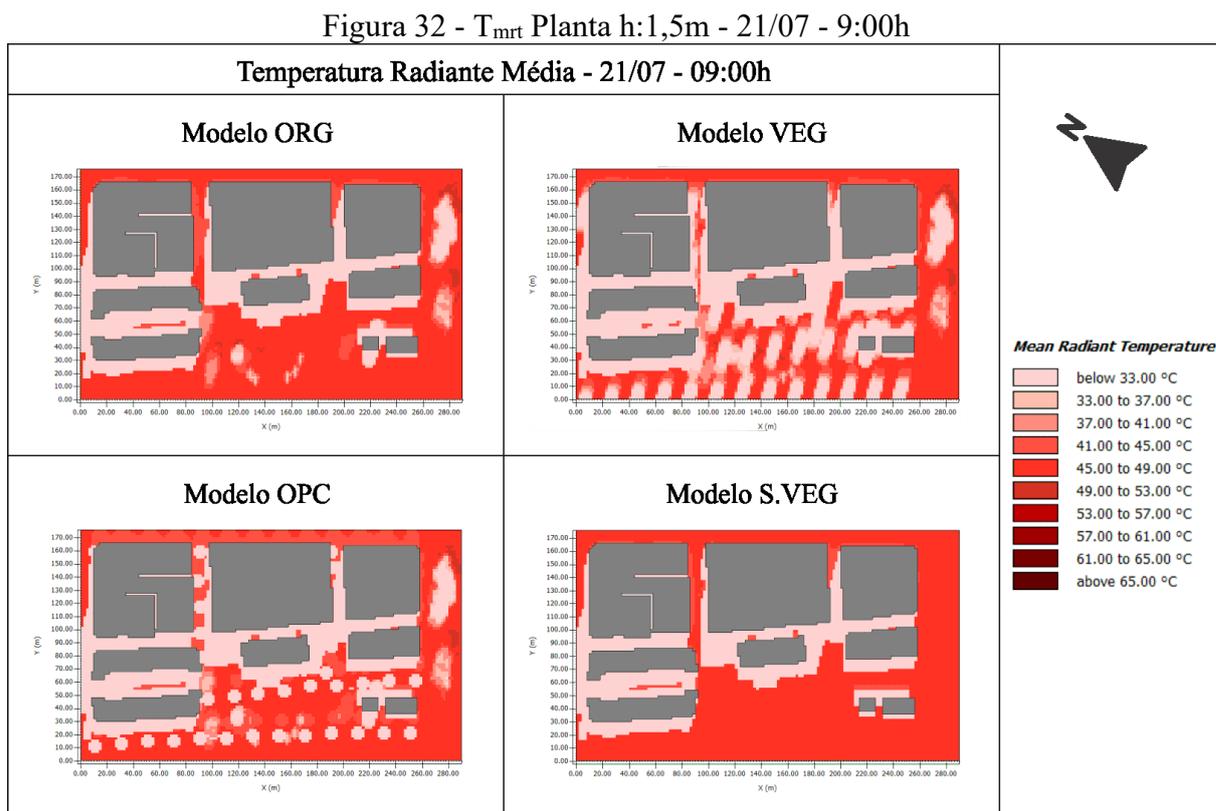


Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Para esse horário somente são notadas diferenças mais significativas no Modelo OPC, com a diminuição gradual da  $T_{mrt}$  na altura de 6m, logo abaixo de sua instalação de valores acima de 65°C para valores entre 45 a 49°C. No Modelo VEG há uma leve alteração em relação ao sombreamento do edifício, na Conselheiro Mafra, onde a temperatura chega a se manter no nível mais baixo entre 53 a 57°C. Entre os modelos ORG e S.VEG não são notadas alterações, ficando com valores predominantes acima de 65°C.

#### 4.3.2 Temperatura Radiante Média – 21 de julho

Os resultados para o período das 9:00h da manhã, para o dia 21/07 são apresentados na Figura 32, os mapas expõem dados do Modelo ORG e suas 3 variações, Modelo VEG, Modelo OPC e Modelo S.VEG.



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

No Modelo ORG os valores de  $T_{mrt}$  se mantém entre 22,6 a 50,3°C, grande parte da área se mantém entre os valores 45 a 49°C, sendo outra vez possível notar as áreas sombreadas pela vegetação existente, nos pontos do Largo da Alfândega e ao norte da rua Arcipreste Paiva com valores abaixo de 33°C. Valores abaixo de 33°C também são percebidos nos lados oeste e

sul em todas edificações no Modelo ORG e todas as três variações, demonstrando que a radiação solar direta não incide nesses pontos nesse horário do dia, considerando o fato de terem perdido bastante calor no período noturno, se mantêm menos quentes.

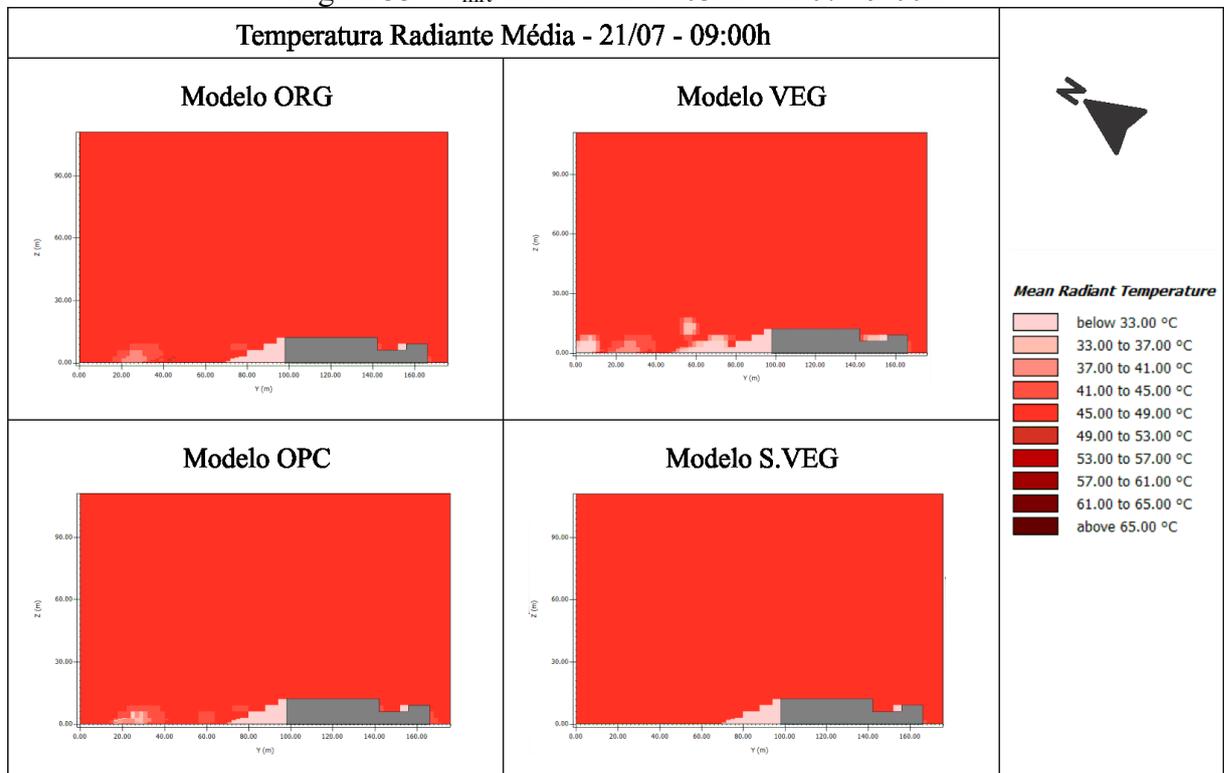
No Modelo VEG podemos notar os efeitos do sombreamento das árvores em todas as vias que foram inseridas. O mesmo acontece com o Modelo OPC, mas de forma menos abrangente nas bordas de cada elemento de sombreamento. Entre o Modelo VEG e o Modelo OPC, os valores  $T_{mrt}$  menores, ocasionados pelos sombreamentos, se mantêm de forma mais dispersa. O restante da área não sombreada pelas adições dos elementos, se mantêm entre os valores de 45 a 49°C.

Para o Modelo S.VEG, em comparação ao Modelo ORG, é notado o aumento dos valores de  $T_{mrt}$  abaixo das áreas de vegetação suprimida. Antes com valores abaixo de 33°C, apresentam valores entre 45 a 49°C na versão sem a vegetação.

É interessante notar que para o Modelo OPC, ele produz dois efeitos de diminuição da  $T_{mrt}$ , um alinhado com seu posicionamento e outro, mais visível, com a projeção de sua sombra.

A visualização em corte dessa área é exibida na Figura 33, para os quatro modelos no horário das 9:00h do dia 21/07.

Figura 33 -  $T_{mrt}$  Corte eixo x 103m - 21/07 - 9:00h



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

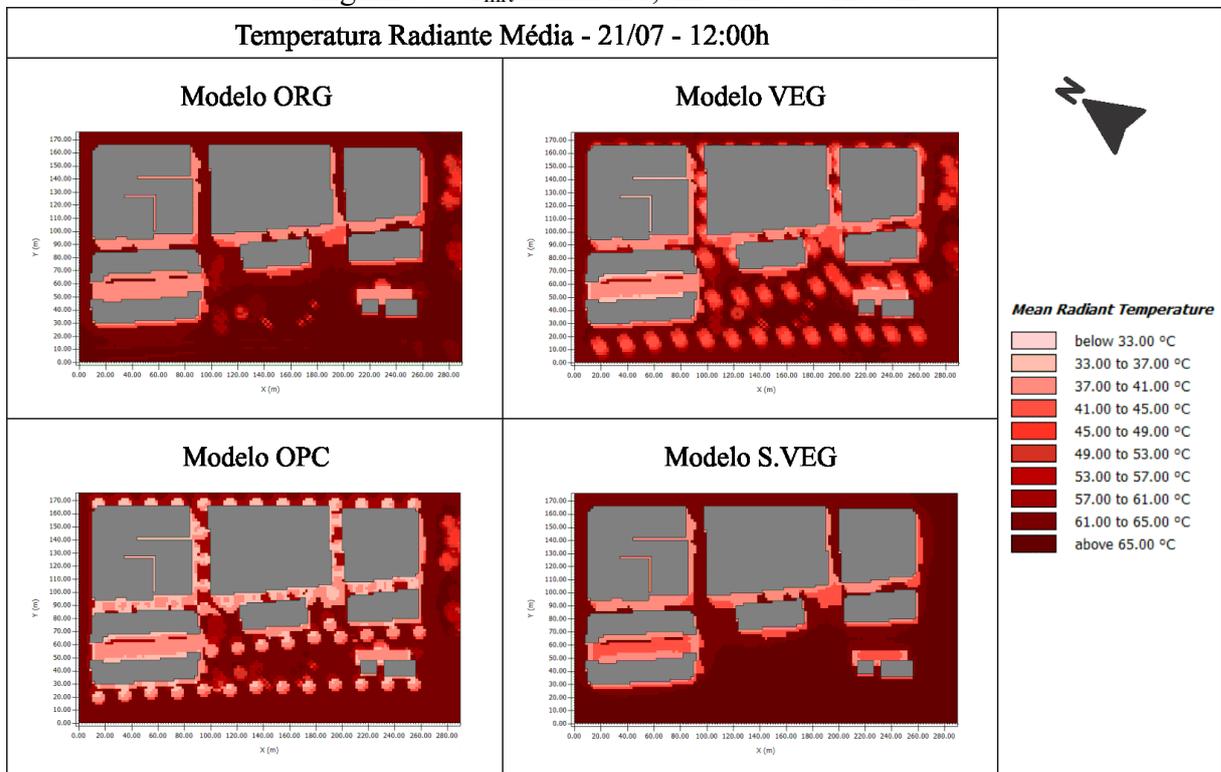
No Modelo ORG são notados os efeitos das árvores existentes, mantendo valores de  $T_{mrt}$  entre 37 a 41°C abaixo do nível da copa. É possível visualizar o ângulo de incidência de radiação solar direta com a edificação sombreando parte da Rua Conselheiro Mafra, diminuindo os valores nesse ponto para menores que 33°C. Esse sombreamento da edificação é observado em todos os quatro modelos que também se assemelham com grande parte da massa de ar se mantendo com valores de  $T_{mrt}$  entre 45 a 49°C.

Para o Modelo VEG é possível visualizar valores menores na Avenida Paulo Fontes, que nesse horário é sombreada pela vegetação inserida, além de apresentar diminuição nos pontos centrais do Largo da Alfândega, ocasionados pelo sombreamento das vegetações inseridas do outro lado, na Rua Conselheiro Mafra.

O Modelo OPC segue a lógica de sombreamento do Modelo VEG, no entanto, é menos abrangente, e não diminui a  $T_{mrt}$  em níveis acima de sua instalação, a 6m. Já no Modelo S.VEG é possível notar o aumento da  $T_{mrt}$  nos locais de supressão da vegetação, mantendo os valores entre 45 a 49°C, onde antes marcavam valores entre 37 a 41°C.

Para o horário do meio-dia, no dia 21 de julho os mapas em planta são mostrados na Figura 34.

Figura 34 -  $T_{mrt}$  Planta h:1,5m - 21/07 - 12:00h



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

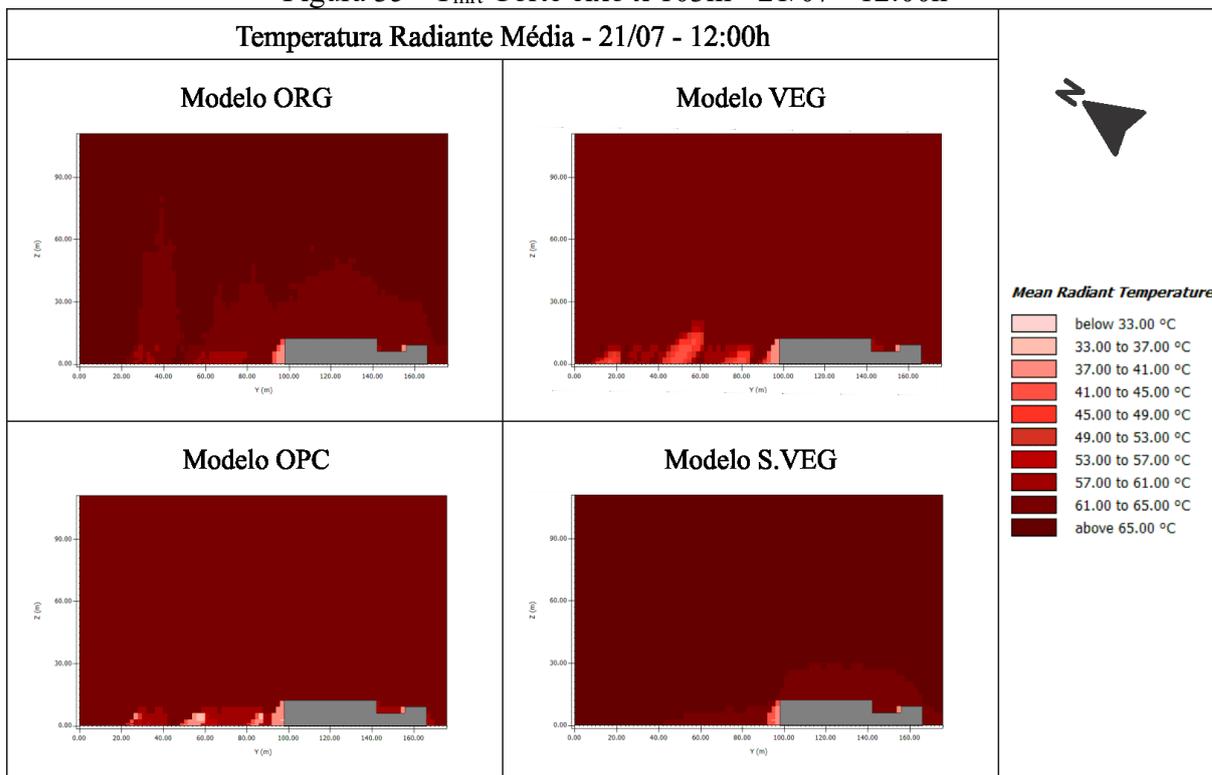
Os valores de  $T_{mrt}$  para o horário do meio-dia aumentam de maneira geral comparado com o período da manhã no mesmo dia. No Modelo ORG os valores de  $T_{mrt}$  marcam entre 38,4 a 68,4°C. Nesse modelo são visíveis pontos com menores valores abaixo da vegetação existente, bem como os pontos onde há vegetação baixa de cobertura do solo nos canteiros centrais da Avenida Paulo Fontes.

Para o Modelo VEG há uma redução dos valores de  $T_{mrt}$ , além dos pontos sombreados pelas árvores inseridas, na Avenida Paulo Fontes, na Rua Arcipreste Paiva, na Rua Felipe Schimidt e na parte de cima do Largo da Alfândega, onde antes marcava valores acima de 64°C, agora marca valores entre 61 e 65°C. Na Rua Conselheiro Mafra, no Modelo ORG, valores entre 37 a 41°C, no Modelo VEG, esses valores passaram a ser mais abrangentes, com tendência a se manterem mais baixos. A Rua Deodoro e Rua Trajano, também é notado diminuição de pontos que antes marcavam entre 61 a 65°C, no Modelo ORG, agora marcam valores entre 37 a 41°C. Explicados pelo bloqueio da radiação solar direta da copa das árvores.

O Modelo OPC alcança valores menores em comparação com os alçados no Modelo VEG, com valores entre 33 a 41°C, onde antes os valores ultrapassavam os 65°C. É notado que o elemento opaco, tem um efeito concentrado em seu sombreamento, mantendo os níveis de  $T_{mrt}$  de seus arredores entre 61 a 65°C, também é possível ver os efeitos alinhados ao seu posicionamento. A via mais beneficiada com este sombreamento é a Rua Conselheiro Mafra variando de 33 a 41°C.

O Modelo S.VEG apresentou os maiores valores em relação aos outros nesse mesmo horário, ficando entre 38 a 66,1°C. A via Conselheiro Mafra apresentou os mesmos valores do Modelo ORG, resultado do sombreamento das edificações. A Avenida Paulo Fontes, a Rua Arcipreste Paiva e a área central do Largo da Alfândega apresentaram valores superiores a 65°C.

Para representação do corte no eixo x para esse horário é apresentada a Figura 35, que expõe as quatro variações do modelo para o horário do meio-dia no dia 21/07.

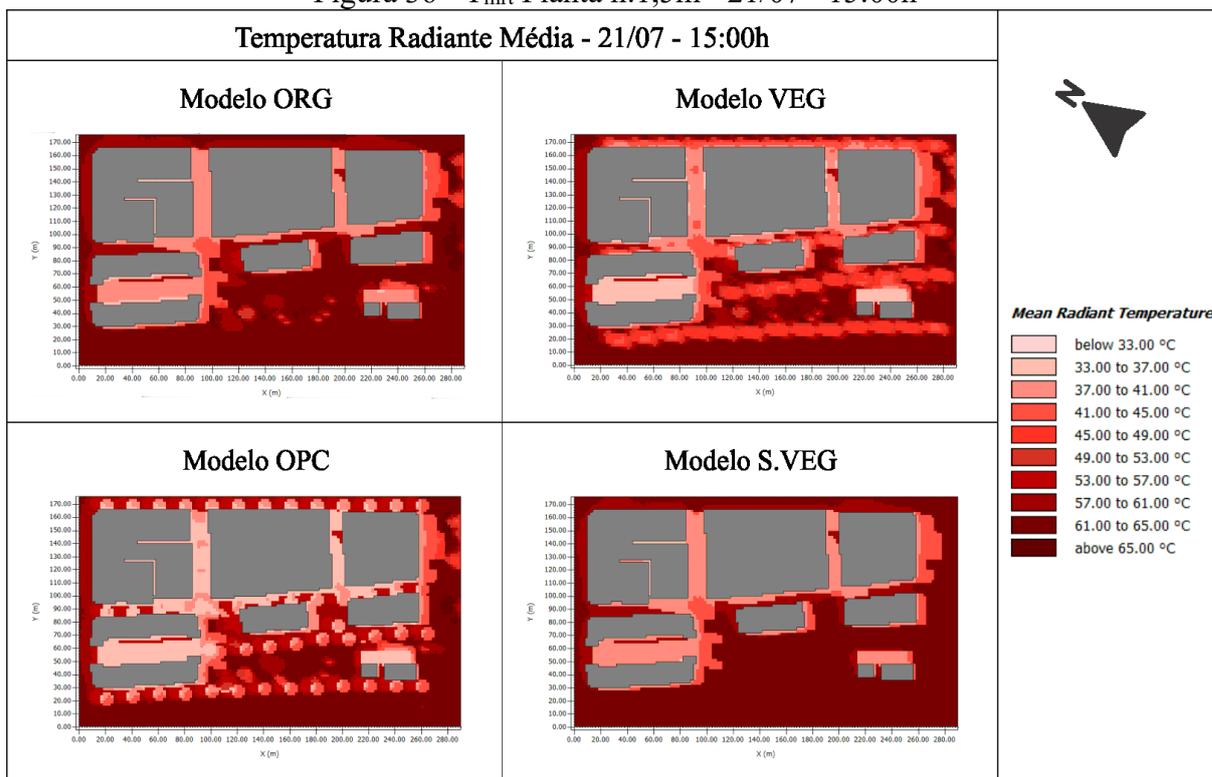
Figura 35 -  $T_{mrt}$  Corte eixo x 103m - 21/07 - 12:00h

Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

No Modelo ORG é notado o efeito que a vegetação existente produz. Os valores próximos às copas das árvores ficam entre 57 a 61°C e mantém os valores de  $T_{mrt}$  entre 61 a 65°C nos níveis mais altos, acima das copas das árvores. A inserção de vegetação no Modelo VEG diminui ainda mais esses valores, mantendo valores na altura das copas das árvores entre 41 a 45°C.

Toda a camada de ar mais elevada, muda de valores de  $T_{mrt}$  acima de 65°C no Modelo ORG para valores entre 61 e 65°C no Modelo VEG e Modelo OPC, já no Modelo S.VEG, a temperatura acima de 65°C prevalece, aumentando de forma geral em todo o ambiente.

Na Figura 36 são apresentados os mapas para os quatro modelos no período da tarde do dia 21/07.

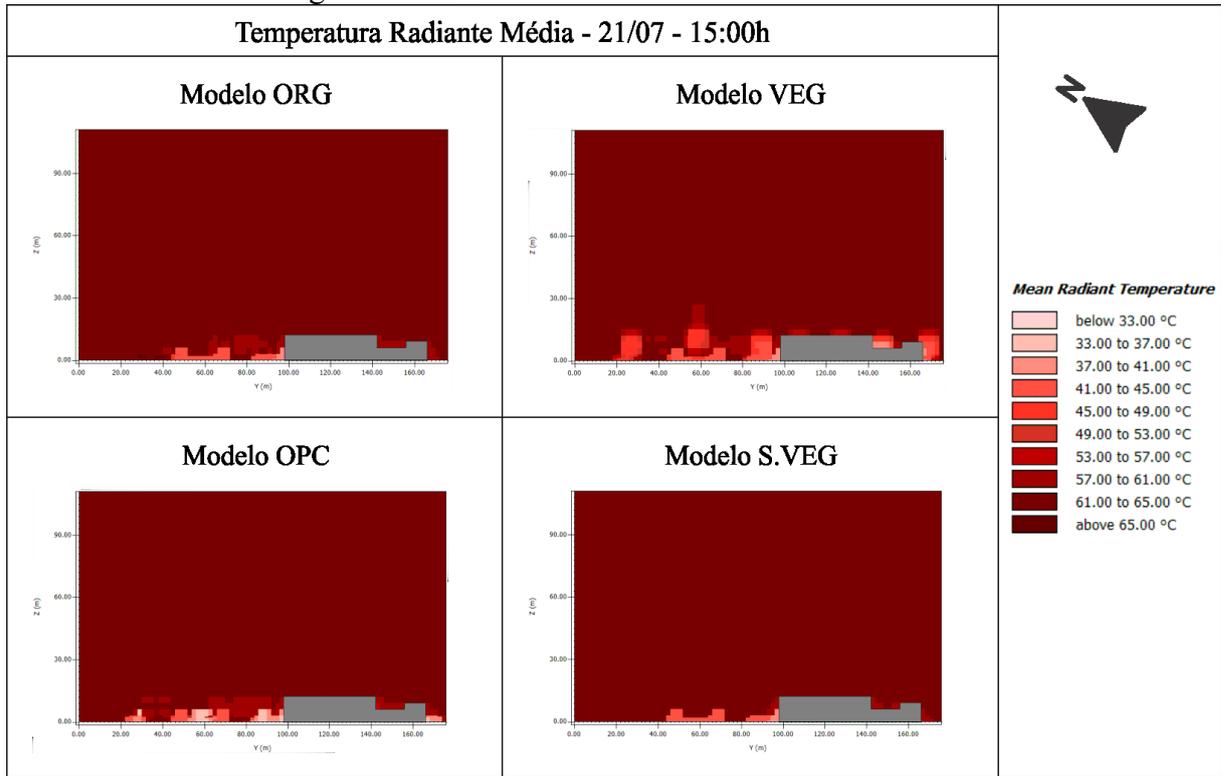
Figura 36 -  $T_{mrt}$  Planta h:1,5m - 21/07 - 15:00h

Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

No horário da tarde os valores de  $T_{mrt}$  já aparecem com menos intensidade que no horário anterior. No Modelo ORG os pontos onde existe vegetação são bem visíveis, tanto na área do Largo da Alfândega como ao norte da Rua Arcipreste Paiva, marcando  $T_{mrt}$  entre 57 a 61°C. Pelo horário do dia e pelo posicionamento, a Rua Deodoro, a Rua Trajano e Rua Arcipreste Paiva são sombreadas pelas edificações, gerando valores de  $T_{mrt}$  mais baixos, entre 37 a 41°C. Para o Modelo com a adição de vegetação, Modelo VEG, os valores posicionados em todas as vias que foram aplicadas, baixam para 45 a 49°C.

No horário das 15:00h é mais notável os dois efeitos que o elemento opaco produz. Um alinhado com seu posicionamento e outro, alinhado com a projeção de sua sombra.

A Figura 37 apresenta o corte para o horário das 15:00h para o dia 21/07.

Figura 37 -  $T_{mrt}$  Corte eixo x 103m - 21/07 - 15:00h

Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Em relação ao corte dos modelos, eles mostram valores de  $T_{mrt}$  mais baixos em relação ao horário do meio-dia, no Modelo ORG, a temperatura da massa de ar mais alta fica entre 61 a 65°C. Segue o padrão, onde é possível visualizar os efeitos da vegetação existente logo abaixo de sua copa, mantendo valores de  $T_{mrt}$  entre 41 e 45°C. No Modelo VEG, esse efeito da vegetação é aumentado, mantendo também valores entre 41 e 45°C, porém os efeitos acima da copa das árvores inseridas nas vias é mais alto, alcançando a altura de até 30m chegando a valores de  $T_{mrt}$  entre 57 e 61°C.

No Modelo OPC os valores mais expressivos são notados somente abaixo dos 6m, da altura de instalação, ficando entre 30 a 37°C no ponto central do elemento de sombreamento disposto nas vias. Já para o Modelo S.VEG não é notada diferença significativa com o Modelo ORG, no entanto, é possível visualizar o aumento do valor de  $T_{mrt}$  nos pontos onde havia vegetação anteriormente.

Os resultados mostram que a temperatura radiante média é altamente influenciada pelo sombreamento, tanto de edificações, árvores ou pelos elementos opacos. Apontado também por Duarte et al. (2015), a redução deste parâmetro através do sombreamento inclui menos radiação direta, difusa e refletida de ondas curtas do sol e menores temperaturas de superfície e, portanto, menor radiação térmica de superfícies urbanas.

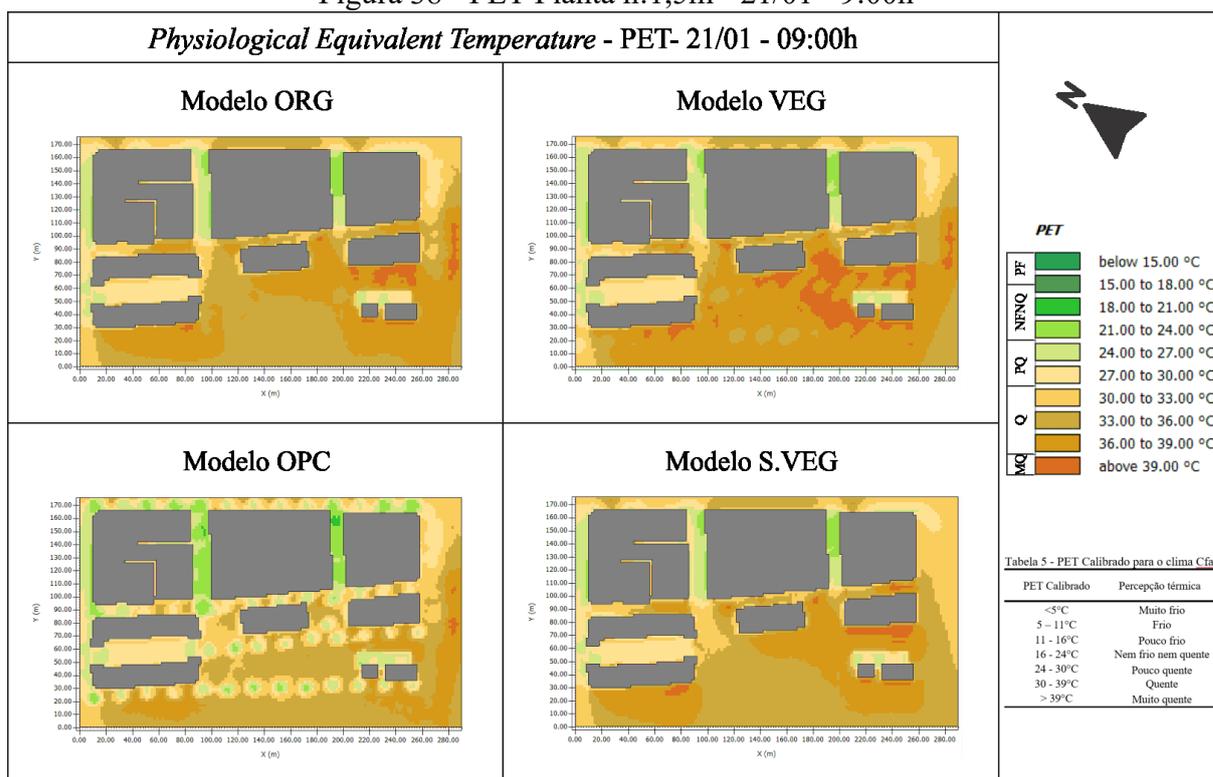
#### 4.4 ANÁLISE PET

O índice de conforto PET leva em consideração fatores combinados para quantificar a sensação térmica. A seguir serão apresentados os resultados para as simulações feitas para os horários de 9:00h, 12:00h e 15:00h dos dias 21/01 e 21/07. Os valores de PET calibrados para o clima Cfa buscam ficar entre 16 a 24°C, considerando Nem Frio e Nem Quente, valores abaixo ou acima desse intervalo representam desconforto por frio ou por calor respectivamente.

##### 4.4.1 PET – 21 de janeiro

Os primeiros resultados para o horário da manhã, às 9:00h, do dia 21/01 são exibidos na Figura 38 e expõem os quatro modelos.

Figura 38 - PET Planta h:1,5m - 21/01 - 9:00h



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

No Modelo ORG as únicas duas áreas que resultaram como Nem Quente e Nem Fria, são, uma na Rua Deodoro e outra na Rua Trajano, ambas entre as edificações existentes. As áreas cobertas do Mercado Público e do Largo da Alfândega se classificaram como Pouco

Quente, resultados esse também encontrados pontualmente na Rua Felipe Schmidt e Rua Jerônimo Coelho. Grande parte do Largo da Alfândega ficou classificado como Quente, incluindo a Rua Conselheiro Mafra e a Avenida Paulo Fontes. Os pontos em laranja mais fortes localizados no Largo da Alfândega e próximo à Rua Arcipreste Paiva foram os únicos que passaram para o nível Muito Quente do índice PET.

O Modelo VEG apresentou aumento do nível PET na área central do Largo da Alfândega, passando de Quente para Muito Quente. Esse resultado pode estar associado à umidade relativa do ar, que apresenta níveis mais altos para esse período do dia, somado ao processo biológico da vegetação de evapotranspiração, pode deixar o ar ainda mais úmido. Segundo Feitosa e Wilkinson (2018), os níveis de umidade relativa desempenham um papel importante no estresse térmico por calor, pois regulam a taxa de evaporação do suor da pele que permite ao corpo humano se resfriar em dias quentes, atuando diretamente na capacidade da pele em evaporar o suor. Resultando assim, em níveis elevados umidade relativa do ar que conseqüentemente, resultam em uma menor taxa de evaporação da pele e maior temperatura aparente.

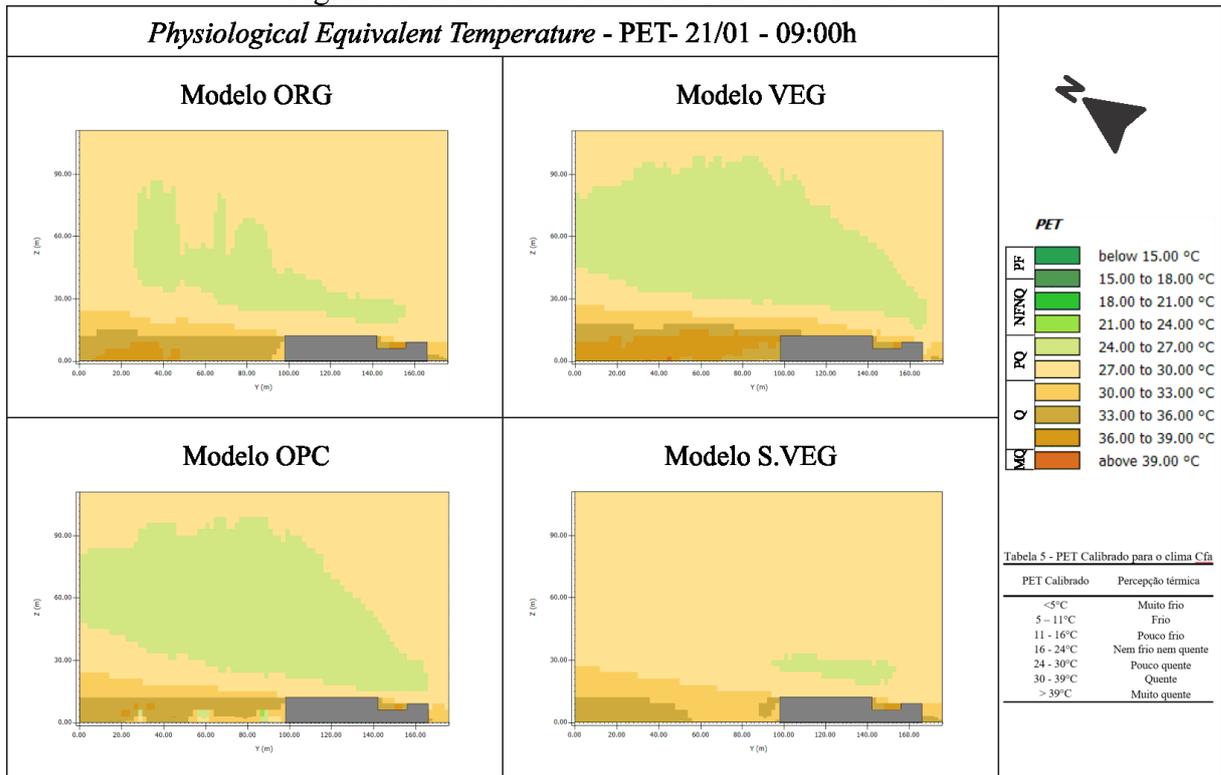
Outro fator pode estar associado aos cálculos do software, uma vez que alguns autores como Liu, Zheng e Zhao (2018) indicam que a umidade do ar é superestimada e a temperatura do ar é subestimada, podendo ocasionar desvios nos resultados.

Para o Modelo OPC os resultados de PET se classificam como Nem Frio e Nem Quente no ponto central da projeção da localização do elemento de sombreamento opaco, no entanto, ainda sob a sua projeção, seus arredores se mantêm como Pouco Quente e Quente. A Rua Conselheiro Mafra e a Rua Felipe Schmidt apresentaram valores entre Pouco Quente e Quente, enquanto a Rua Deodoro e a Rua Trajano apresentaram valores entre Nem Frio e Nem Quente. Os valores obtidos de PET para essa área podem ser correlacionados aos resultados de  $T_{mrt}$ , os quais se mostraram em valores menores, na Rua Deodoro e na Rua Trajano.

O Modelo S.VEG apresentou pouca mudança em relação ao Modelo ORG, apresentando mudança ao norte da Rua Arcipreste Paiva, valores que antes se encaixavam como Pouco Quente, agora se encaixam em Quente. Uma vez que o Modelo ORG também possui pouca vegetação inserida e é caracterizada como caducifólia, possuindo menos densidade foliar.

Para entender melhor o efeito da vegetação e do sombreamento opaco no meio urbano, a Figura 39 demonstra um corte no eixo x, com distanciamento de 103m, para o mesmo horário, às 9:00h, do dia 21/01.

Figura 39 - PET Corte eixo x 103m - 21/01 - 9:00h



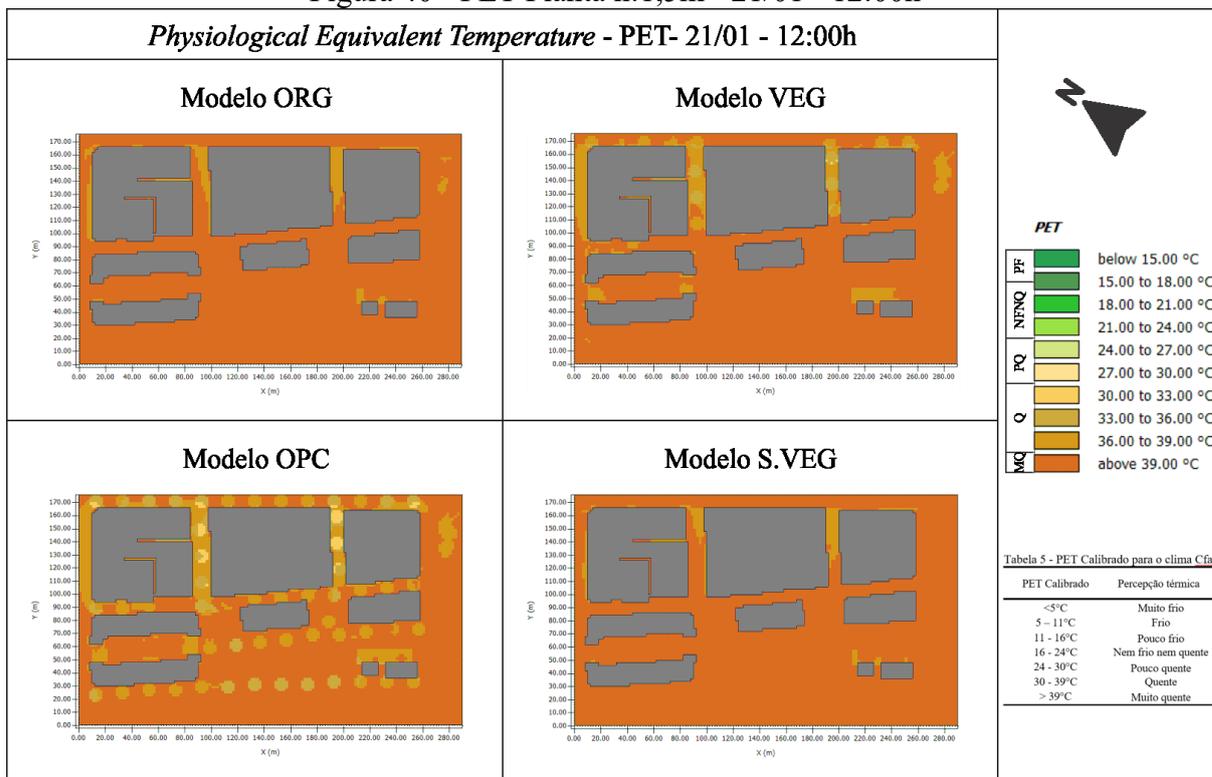
Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Ao nível do pedestre, no Modelo ORG, o nível PET se mantém no estágio de Quente, na massa de ar mais alta, entre 30 a 90m, os níveis se apresentam como Pouco Quente. Para o Modelo VEG, não há mudança no nível do pedestre, no entanto, nessa faixa mais alta é notada que entre os dois tons que se classificam como Pouco Quente, há uma diminuição causada pela adição da vegetação, ocorrendo de forma similar no Modelo OPC, que se diferencia somente logo abaixo da altura de inserção dos elementos opacos. Reação que não vemos no Modelo S.VEG, que tende a ter temperaturas de PET mais altas inclusive em níveis mais altos da área analisada.

O aumento do índice PET no Modelo VEG pode ter sido ocasionado por um adensamento de vegetação, como apontado também por Priya e Senthil (2021), que afirmam que apesar das árvores serem uma excelente forma de controlar o conforto térmico ao ar livre, uma superlotação pode ocasionar uma maior estagnação no ar, aumentando a umidade, resultando em desconforto térmico para o humano.

As análises para os quatro modelos do período do meio-dia para o mesmo dia 21/01 são exibidas na Figura 40.

Figura 40 - PET Planta h:1,5m - 21/01 - 12:00h



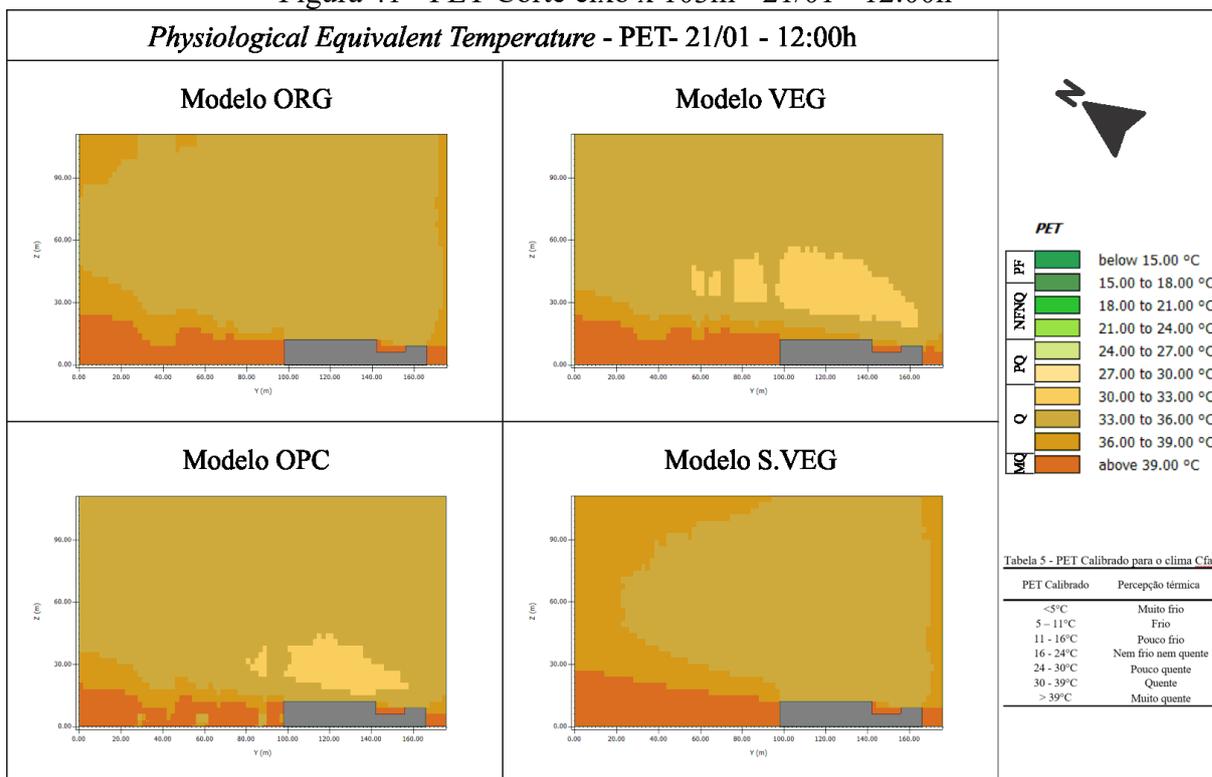
Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Para o horário das 12:00h, no Modelo ORG, com exceção de pontos pequenos localizados na Rua Jerônimo Coelho, Rua Deodoro, Rua Trajano, Rua Arcipreste Paiva e no Largo da Alfândega estarem como Quente, o grande restante da área se classifica como Muito Quente. Para o Modelo VEG há pontos de melhora nas ruas verticais e o sombreamento pela cobertura do Largo da Alfândega mudam de Muito Quente para Quente. O que ocorre também com o Modelo OPC há alteração na projeção da sombra dos elementos de sombreamento opaco, também alterando o nível de Muito Quente para Quente.

Já o Modelo S.VEG comparado ao Modelo ORG, há mudança na Rua Deodoro, diminuindo a área que se classificava como Quente para se tornar Muito Quente. Representando que a retirada da vegetação piora ainda mais a sensação térmica do pedestre.

A Figura 41 apresenta o corte no eixo x para a área nesse mesmo horário, do meio-dia para os quatro modelos.

Figura 41 - PET Corte eixo x 103m - 21/01 - 12:00h



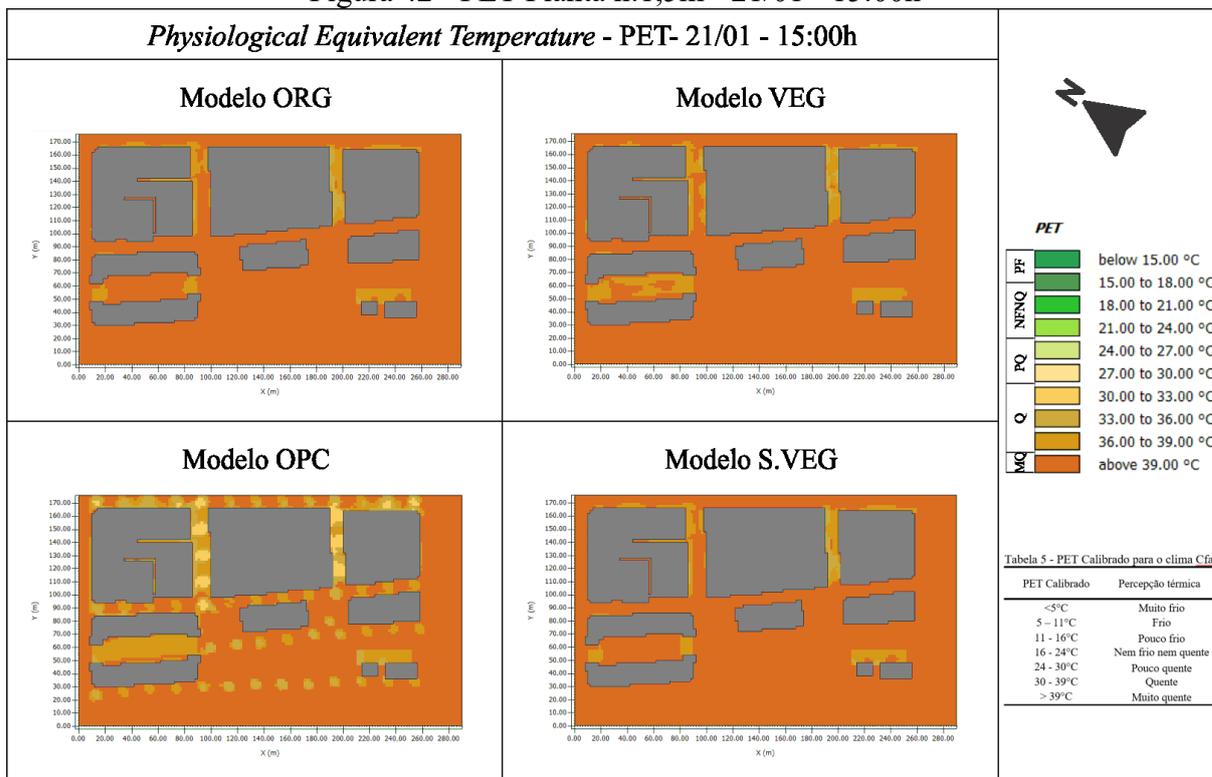
Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Os resultados em corte seguem o padrão do período da manhã, no entanto em todos os modelos, só são obtidos valores do nível Quente e Muito Quente. No Modelo S.VEG é possível notar o aumento da massa de ar classificada como Muito Quente em relação ao Modelo ORG. Reforçando a colocação que Dimoudi e Nikolopoulou (2003) fazem em relação ao efeito microclimático das árvores, auxiliando também na redução de ganhos de calor solar em janelas, paredes e telhados por meio de sombreamento.

Para o Modelo OPC, são notadas diminuições do nível PET abaixo da altura de inserção dos elementos opacos.

A Figura 42 exhibe os resultados para os modelos no horário da tarde, às 15:00h para os quatro modelos analisados.

Figura 42 - PET Planta h:1,5m - 21/01 - 15:00h

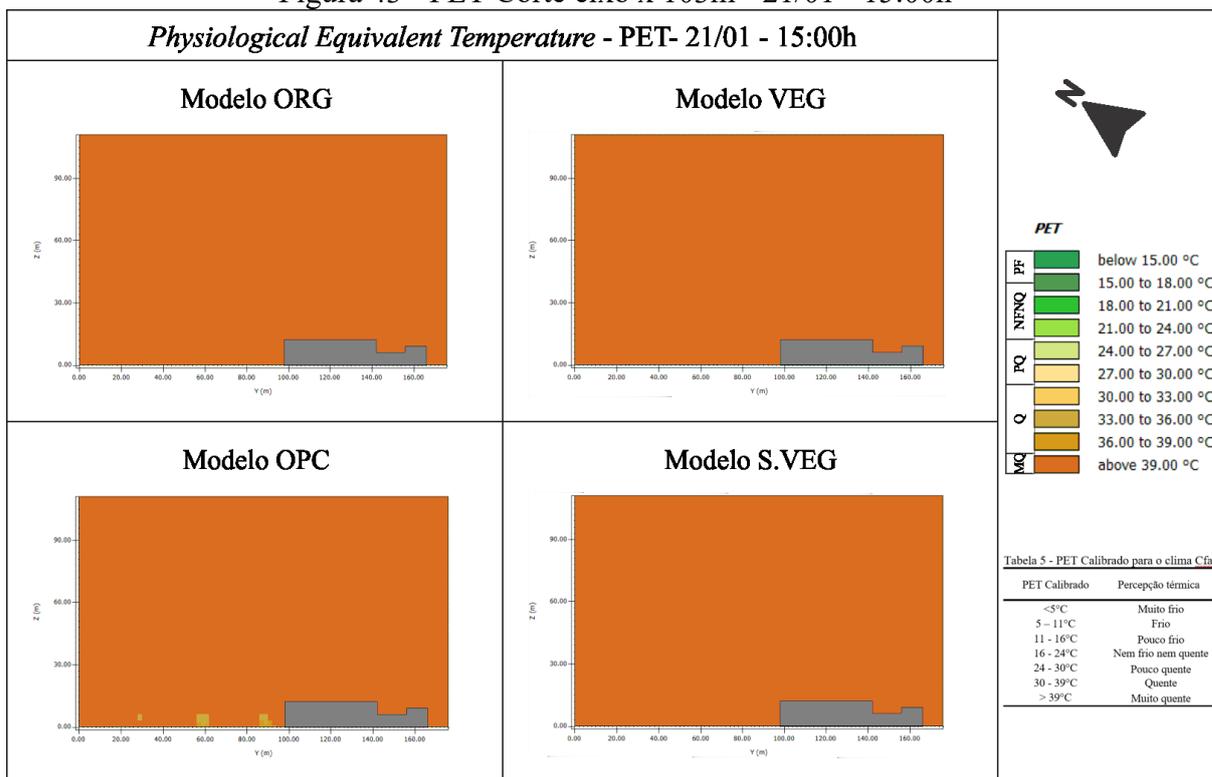


Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

O período da tarde ainda apresenta valores altos de PET, no Modelo ORG a cobertura do Largo da Alfândega, a Rua Deodoro e a Rua Trajano apresentam valores do nível Quente, o restante da área se classifica como Muito Quente. Essas áreas classificadas como Quente, ficam mais abrangentes com a adição da vegetação no Modelo VEG, enquanto o restante das áreas permanecem como Muito Quente. Já no Modelo OPC, isso é mais visível com a adição dos elementos de sombreamento opacos em todas as vias que foram adicionados, mas mesmo assim, todas as áreas se mantêm no nível Quente e Muito Quente. Não são notadas diferenças para esse horário ao nível do pedestre entre os modelos ORG e S.VEG.

A Figura 43 demonstra o corte para os modelos no horário da tarde, às 15:00h para o dia 21/01.

Figura 43 - PET Corte eixo x 103m - 21/01 - 15:00h



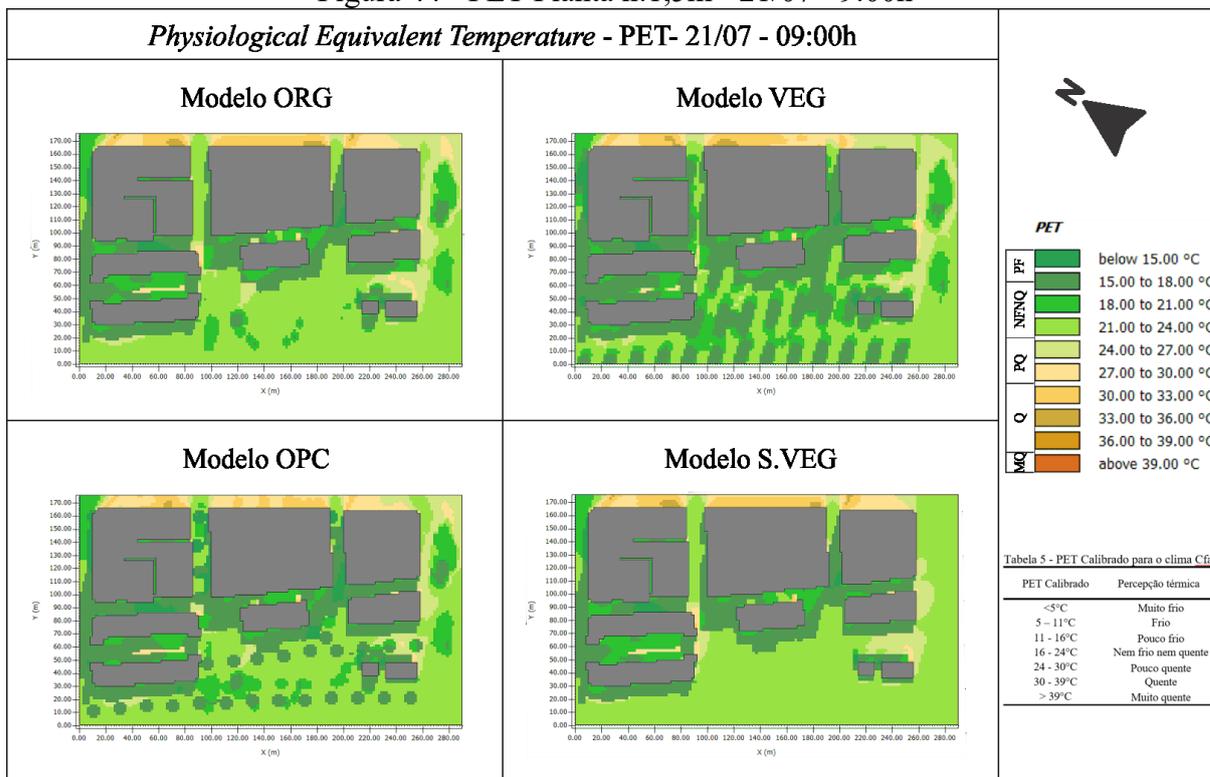
Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Em relação ao corte para esse horário, somente é visualizada alteração para o Modelo OPC, apresentando valores para Quente para as áreas logo abaixo de sua instalação, enquanto o restante das áreas e dos modelos marcam níveis de Muito Quente.

#### 4.4.2 PET – 21 de julho

O mês de julho apresenta temperaturas do ar mais baixas, e no período da manhã uma umidade do ar elevada. Para esse período a vegetação é menos densa, por ser caducifólia. A Figura 44 apresenta os mapas para os quatro modelos no período da manhã, às 9:00h, no dia 21/07.

Figura 44 - PET Planta h:1,5m - 21/07 - 9:00h



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Esse horário tende a ser mais frio, pois recebeu menos radiação solar no período do dia, apresenta umidade relativa alta e temperaturas do ar baixas. No Modelo ORG, algumas áreas como na extensão entre as edificações e o Mercado Público na Rua Conselheiro Mafrá e na Rua Trajano, também entre as edificações existentes, apresentam temperaturas do nível e Pouco Frio do PET. A Rua Felipe Schmidt apresenta níveis de Quente. A parte Rua Arcipreste Paiva se enquadra como Pouco Quente, já o restante da área se mantém com níveis de Nem Frio e Nem Quente. A umidade causada pelas árvores também pode ter sido um fator para que o nível PET ficasse como Pouco Frio, já que as árvores acabam aumentando a umidade relativa do ar (WANG et al., 2019) pelo processo de evapotranspiração.

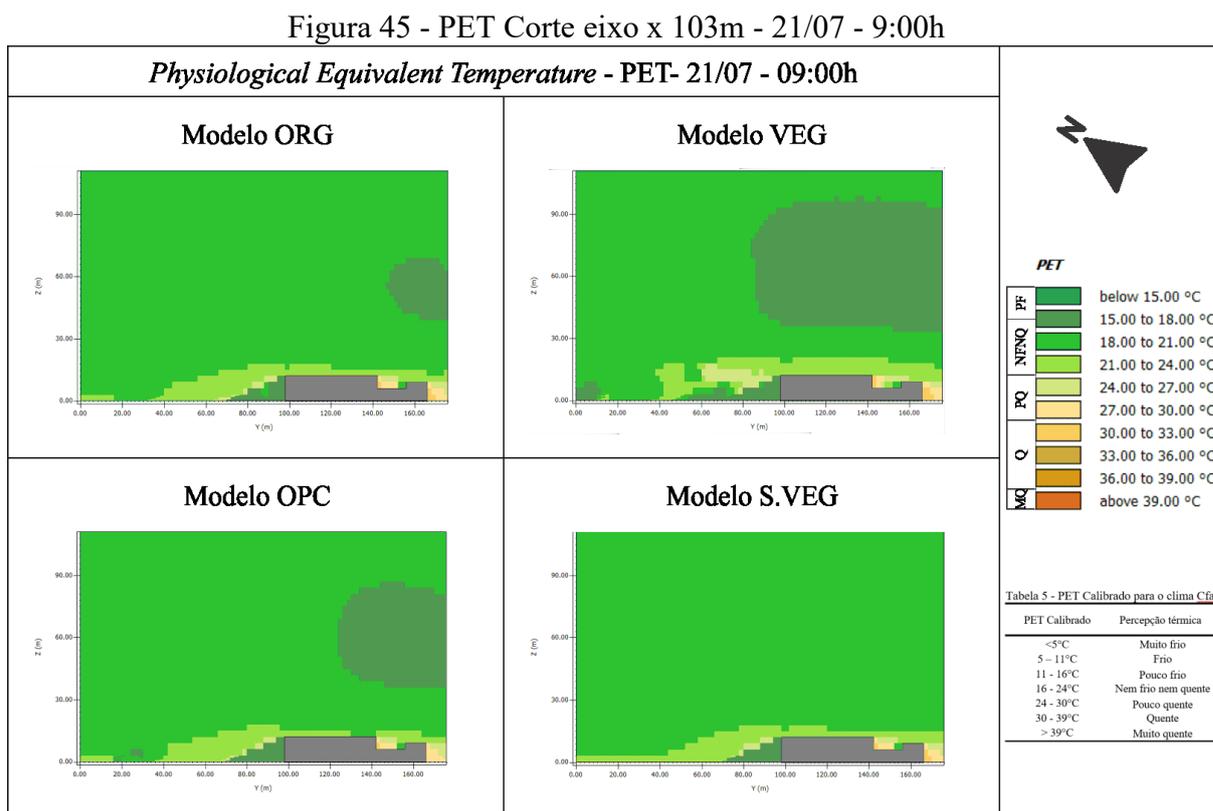
No Modelo VEG os pontos abaixo das projeções das sombras das árvores apresentam níveis mais baixos, mas ainda se classifica como Nem Frio e Nem Quente, acompanhando grande parte da área. A Rua Felipe Schmidt se mantém como Quente e Pouco Quente.

O Modelo S.VEG não apresentou grandes diferenças em relação ao Modelo ORG, todavia, nos locais que antes existiam as árvores, a temperatura se elevou, mas manteve a classificação de Nem Frio e Nem Quente.

Podemos notar que o sombreamento, tanto por árvores como por elementos opacos adicionados, teve influência direta, diminuindo os valores de PET logo abaixo de sua

localização. A demarcação do sombreamento das edificações também é visível em todos os modelos. Dentre os períodos analisados, esse foi o que demonstrou melhor desempenho, alcançando facilmente nos níveis de Nem Frio e Nem Quente.

A Figura 45 apresenta esse mesmo momento, às 9:00h do dia 21/07, para os quatro modelos em corte.



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

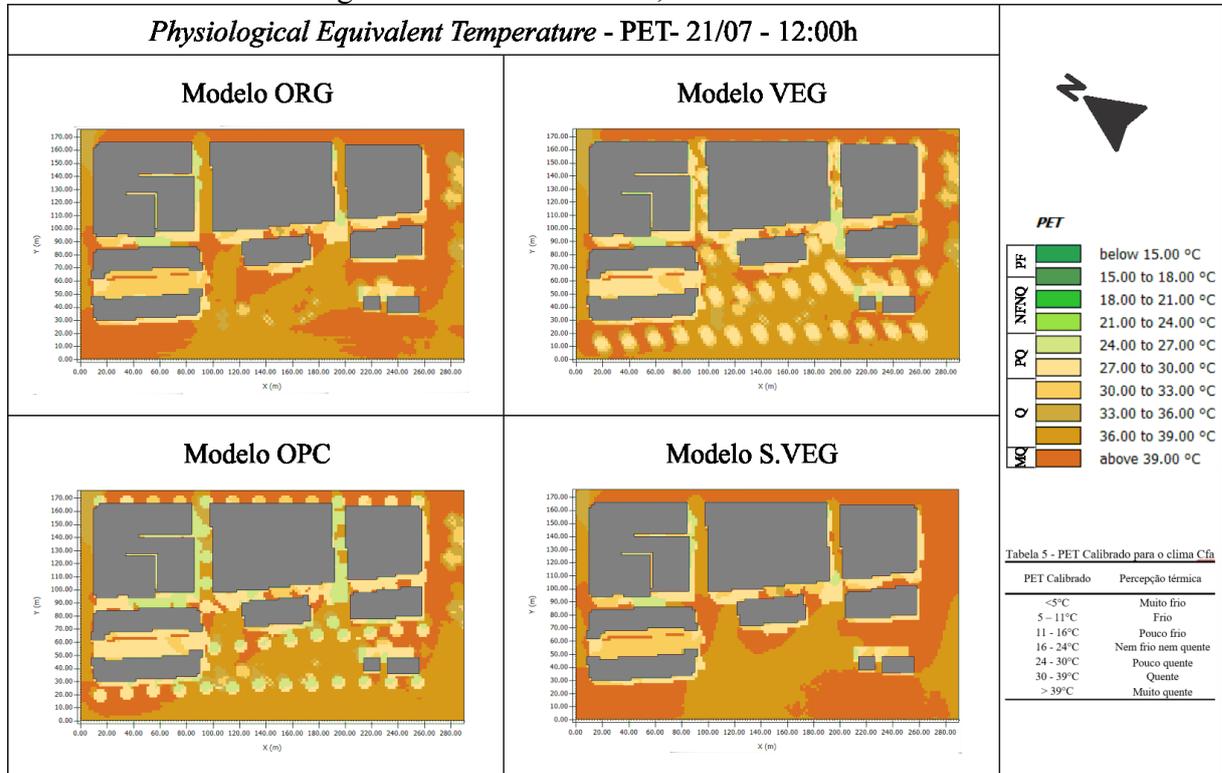
As representações em corte apresentam a Rua Felipe Schimidt com valores de Quente nos Modelos ORG, VEG e S.VEG. Já o modelo OPC, apresenta o mesmo ponto como Pouco Quente. É possível visualizar o sombreamento da edificação incidindo na Rua Conselheiro Mafra em todos os modelos.

Para a massa de ar mais alta, notamos que no Modelo VEG é o que apresenta valores menores de PET, mas ainda assim se enquadra como Nem Frio e Nem Quente, exceto na altura das copas das árvores no Largo da Alfândega, onde elevou levemente o nível para Pouco Quente.

O Modelo S.VEG é o modelo que apresenta os maiores níveis de PET para esse horário, no entanto há pouca diferença substancial.

A Figura 46 retrata os modelos para o horário do meio-dia, às 12:00h, no dia 21/07 para os quatro modelos.

Figura 46 - PET Planta h:1,5m - 21/07 - 12:00h



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Em relação ao período da manhã, nesse horário, os níveis de PET aparecem com valores mais altos. No Modelo ORG todas as áreas se mantiveram acima do nível Pouco Quente que se apresentou em trechos da Rua Conselheiro Maфра. Grande parte da área central do Largo da Alfândega se manteve entre Quente e Muito Quente. A vegetação existente desse modelo diminui localmente a temperatura, mas não conseguiu alterar o nível PET.

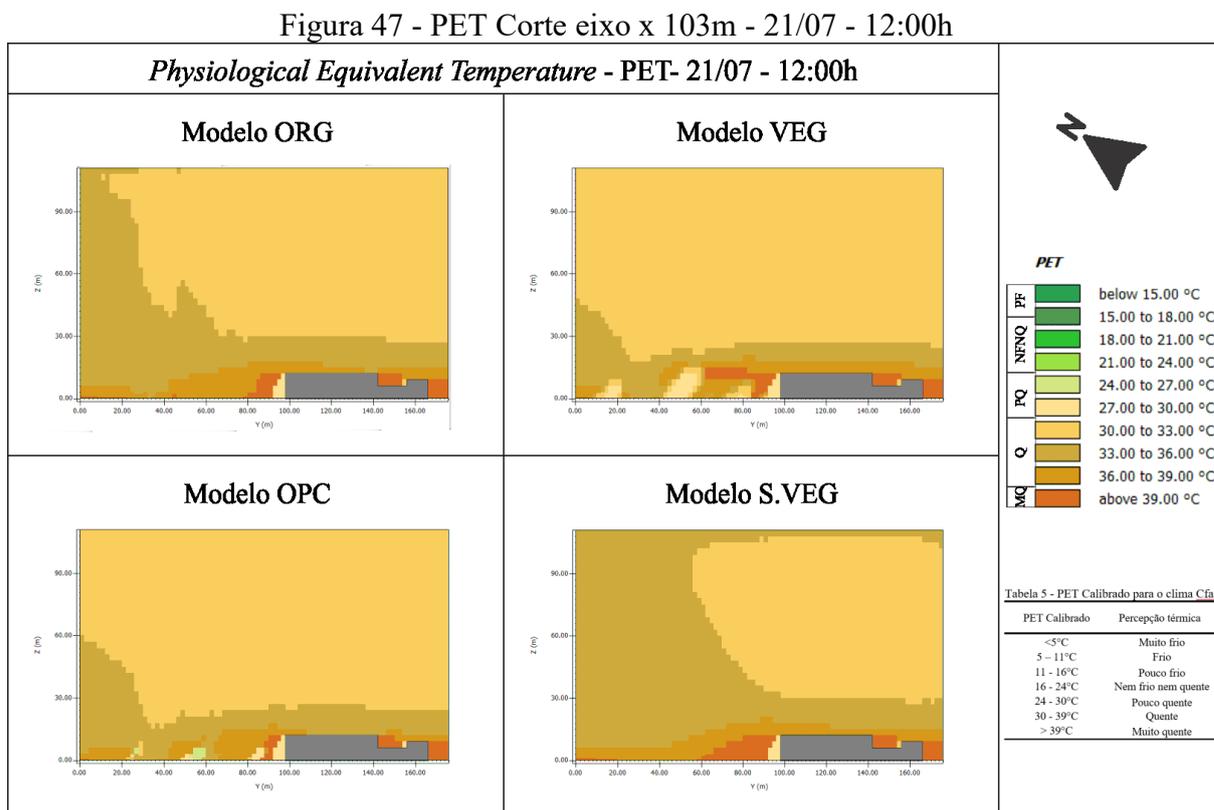
No Modelo VEG, com uma maior quantidade de vegetação inserida, os efeitos podem ser vistos alinhados com a projeção da sombra das árvores, houve uma diminuição no nível Quente para o nível Pouco Quente, exceto na Rua Felipe Schmidt.

Para o Modelo OPC, semelhante ao modelo vegetado, apresenta valores acima de pouco quente. Diferente do modelo vegetado, a sombra nos modelos com o material opaco é sempre mais delimitada. A área central não sombreada permanece com o nível de Quente.

A adição do sombreamento tanto do Modelo VEG quanto do Modelo OPC diminuem os níveis de Muito Quente para Quente na Avenida Paulo Fontes. O que acontece de forma contrária no Modelo S.VEG, que tem um aumento da área de abrangência nesse ponto. Além

de ser visível também o aumento nos pontos onde antes havia árvores, como em pontos isolados no Largo da Alfândega e ao norte da Rua Arcipreste Paiva.

A Figura 47 mostra esses efeitos para os quatro modelos em corte, no horário do meio-dia, às 12:00h, no dia 21/07.



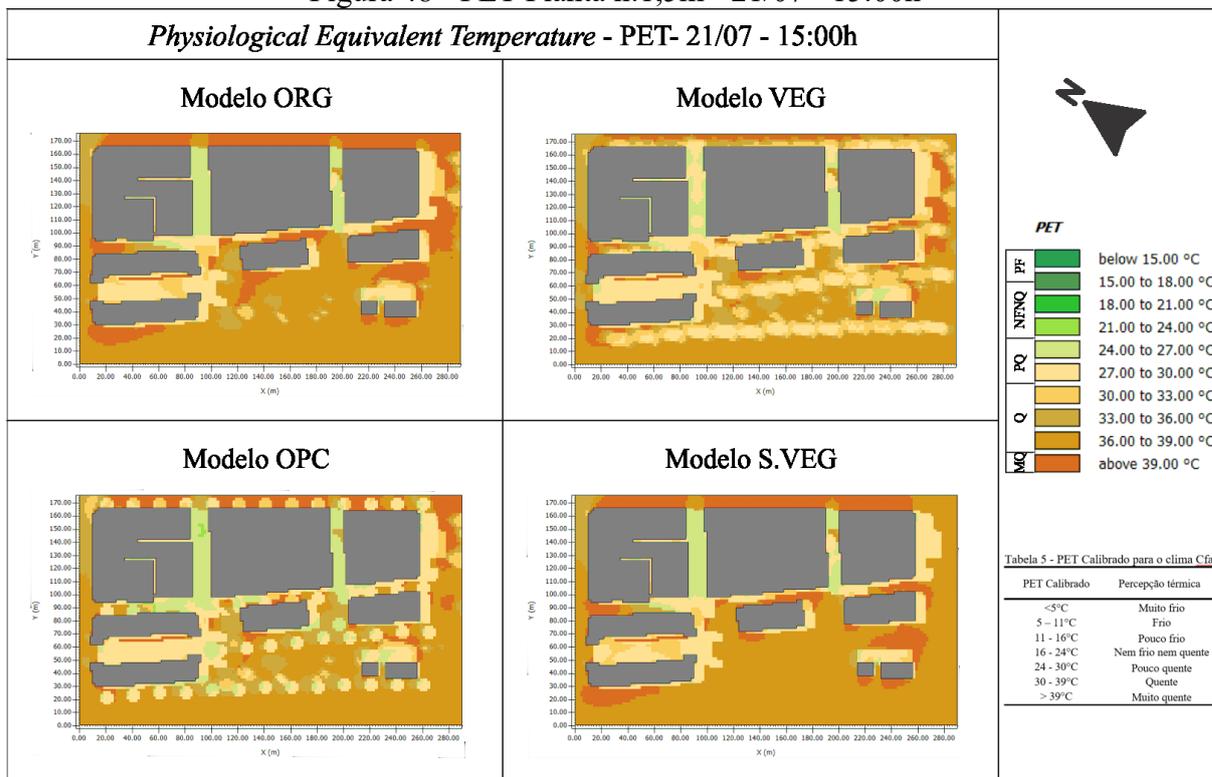
Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Nos dois modelos com a adição de sombreamento, Modelo VEG e Modelo OPC, é visto a diminuição do índice PET nos pontos de inserção, alcançando o nível Pouco Quente.

Nas massas de ar nos níveis mais altos, acima de 30m, podemos perceber que o Nível PET se mantém mais baixo nos modelos com vegetação, no entanto, o Modelo S.VEG, mesmo não alterando seu nível PET, tem um leve aumento. Na altura das edificações é possível ver que no alinhamento da Rua Conselheiro Maфра, a área que estava classificada como Muito Quente no Modelo ORG, fica ainda maior nesse modelo sem vegetação.

A Figura 48 apresenta os mapas para o horário da tarde, às 15:00h, do dia 21/07 dos quatro modelos.

Figura 48 - PET Planta h:1,5m - 21/07 - 15:00h



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Para o Modelo ORG, os valores de PET para o horário da tarde se mantiveram acima do nível Pouco Quente, observados na Rua Deodoro, na Rua Trajano, trechos da Rua Conselheiro Mafra e ao Norte da Rua Arcipreste Paiva. A rua Felipe Schmidt apresentou os maiores valores em PET chegando ao nível Muito Quente, junto com outros pontos específicos como parte da Rua Arcipreste Paiva, próximo ao Mercado Público e a Avenida Paulo Fontes e também próximo ao espaço coberto do Largo da Alfândega.

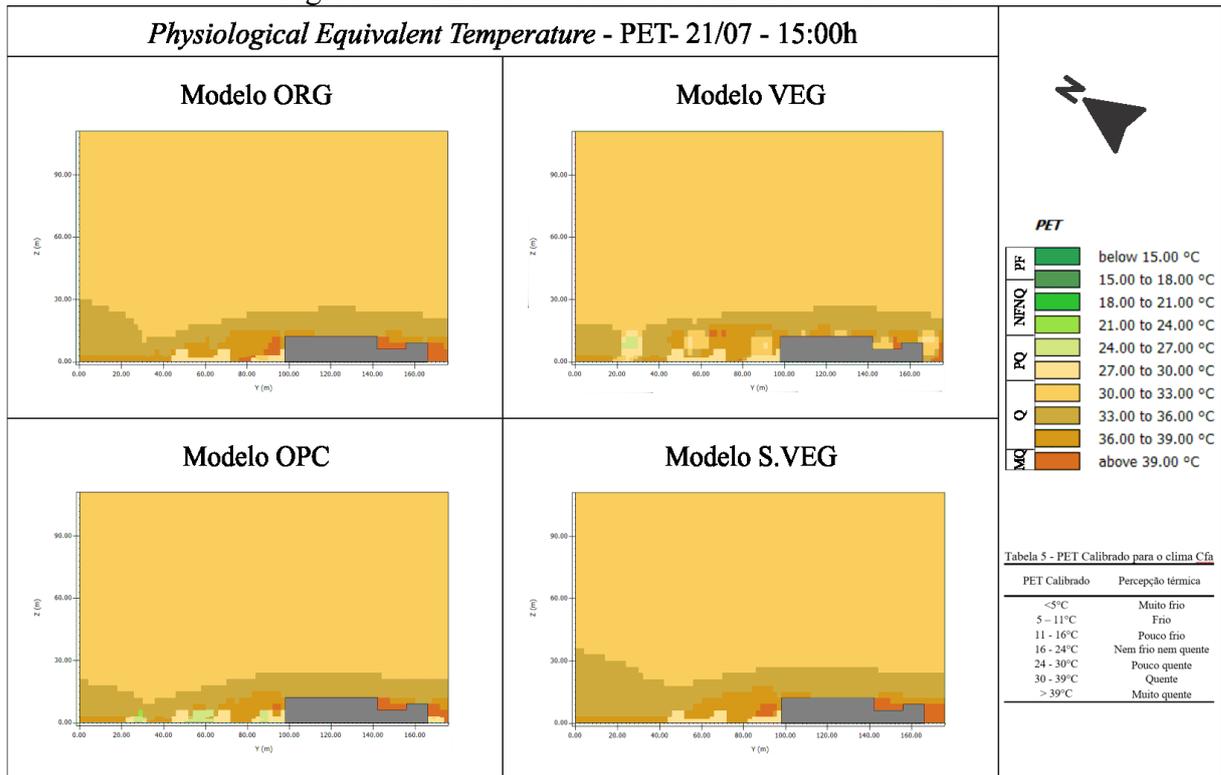
Para o Modelo VEG os índices se mantiveram acima de Pouco Quente. As áreas sombreadas pelas árvores diminuíram a temperatura, entretanto, não alteraram o índice PET.

O Modelo OPC obteve um resultado pontual de melhora na Rua Deodoro, passando para o nível Nem Frio e Nem Quente. De forma geral, para o horário da tarde, as duas formas de sombreamento obtiveram resultados parecidos.

Para o Modelo S.VEG foi possível observar os pontos onde foram retiradas as vegetações existentes, indicando leve melhora no índice, passando de Muito Quente para Quente na Rua Arcipreste Paiva.

A Figura 49 apresenta os cortes para o horário da tarde, às 15:00h, do dia 21/07 para os quatro modelos.

Figura 49 - PET Corte eixo x 103m - 21/07 - 15:00h



Fonte: Adaptado de ENVI-met (2021)

Para a visualização em corte os locais possíveis de se observar os valores de PET com o índice de Pouco Quente estão alinhados com os elementos de sombreamento inseridos, tanto no Modelo VEG, quanto no Modelo OPC. Entre o Modelo ORG e o Modelo S.VEG não são notadas diferenças significativas. Uma vez que a vegetação existente é menos numerosa e está no período de queda de folhagem. Tornando-se modelos parecidos.

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apontadas as conclusões alcançadas com base nos resultados e reflexões construídas durante este estudo. Além disso, apresentam-se as limitações desta pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

A pesquisa foi desenvolvida com foco na ação de elementos de sombreamentos e elementos vegetados, buscando analisar seus diferentes impactos ao nível do pedestre. Foi desenvolvida para a cidade de Florianópolis, clima Cfa, resultou na análise de um microclima urbano para dois dias típicos de projeto, dia 21 de janeiro e 21 de julho.

Com as simulações dos quatro modelos e suas comparações podemos concluir que o Modelo VEG e o Modelo OPC se mostraram potenciais soluções para redução de  $T_{mrt}$  e do índice PET, o Modelo OPC demonstrou melhores resultados ao nível do pedestre logo abaixo de sua projeção de localização, já o Modelo VEG apresentou redução de uma forma menos intensa, no entanto, com maior abrangência. A vegetação apresentou diminuição de temperaturas em níveis mais elevados do modelo, apresentando um efeito microclimático favorável.

Confirmando estudos como de Taha (1997), Matzarakis, Rutz e Mayer (2006), Ali-Toudert e Mayer (2006), (Shashua-Bar, Pearlmutter e Erell (2009), Duarte et al. (2015), Shinzato e Duarte (2018), Rahul, Mukherjee e Sood (2020) e Javadi (2021) a  $T_{mrt}$  é o fator determinante para a avaliação da sensação térmica, afeta o balanço térmico do corpo humano e influencia diretamente o índice PET.

Como exposto também por Abreu-Harbach, Labaki e Matzarakis (2015), o plantio de árvores típicas da região, se torna uma alternativa prática e econômica e plantar árvores adequadas ao redor dos prédios, nas calçadas, vias de pedestres, praças e parques pode ser benéfico no combate às mudanças climáticas em microescala.

É importante ressaltar que o tipo de vegetação escolhido vai influenciar nos resultados, fatores também apontados por Abreu-Harbach, Labaki e Matzarakis (2015) como altura, cobertura verde, forma e permeabilidade da copa têm diferentes resultados quando comparados entre si. Deve ser salientado que há dificuldades na escolha de vegetações que atendam todos os requisitos para que seja utilizada, lembrando que não é aconselhável a utilização de uma espécie única.

Em relação ao sombreamento não vegetado, ele se mostra mais eficaz ao nível do pedestre, no entanto devemos levar em consideração a importância da vegetação para o contexto urbano, tanto para o funcionamento do ciclo hídrico, qualidade do ar e paisagem urbana, identidade cultural da cidade e impacto visual da cidade, os quais influenciam os usos dos espaços abertos. A instalação de elementos de sombreamento opacos requer mais cuidados de manutenção, limpeza e custos em sua implantação.

Não foram listados aspectos de saúde, segurança e lazer que a inserção de vegetação poderia oferecer em relação ao elemento de sombreamento. A vegetação desempenha um papel fundamental no funcionamento do tecido urbano, estudos como de Hartig et al. (2014) apontam que a vegetação é uma forma de incentivar o uso do espaço urbano, proporcionando ambientes naturais para promover a atividade física ao ar livre. Ambientes esses, que podem representar

melhores índices de saúde mental (BEYER et al., 2014), aumentando a vitalidade da cidade (LAI et al., 2020), além de funcionalidades como a filtragem do ar em relação às partículas de poeira (ERELL; TSOAR, 1997) e ter impacto positivo na valorização imobiliária da área de inserção (TEEB, 2010).

O espaço do Largo da Alfândega recebeu há pouco tempo um projeto de revitalização, o qual resultou na supressão de algumas espécies. Com o modelo hipotético que retirou todo o restante da vegetação da área, podemos concluir que não é uma opção benéfica, aumentando ainda mais os valores de  $T_{mrt}$  e PET, aumentando o desconforto por calor. A retirada das árvores, como apontado por Feitosa et al. (2021), alteram os fluxos de energia térmica e reduzem a evapotranspiração, diminuindo os níveis de umidade das superfícies. Além disso, as limitações do fluxo de ar em ambientes urbanos densos, bem como o calor produzido e expelido pela ocupação de edifícios e atividades humanas, contribuem para o efeito de ilhas de calor urbanas.

Como já ressaltado pelo programa Cidades+Verdes, do Meio Ambiente (MMA, 2021), é fundamental que os gestores públicos um olhar mais aprofundado sobre essas estratégias, uma vez que a importância das áreas verdes urbanas vai além do aspecto contemplativo, pois estão intimamente relacionadas aos serviços ecossistêmicos essenciais à saúde e à qualidade de vida nas cidades.

Johansson et al. (2014) afirma que a vegetação fornece resfriamento transpiracional porque a energia solar absorvida causa um aumento do calor latente, resfriando as superfícies das folhas e o ar ao seu redor, no entanto, estudos de Liu, Zheng e Zhao (2018) apontam que o ENVI-met tende a superestimar a temperatura da superfície foliar e subestimar o fluxo de vapor, principalmente ao meio-dia do verão. Ouyang et al. (2022) expõem uma variação para a  $T_{mrt}$  entre modelos simulados em comparação à locais de medição, apontando como uma possível razão em que a  $T_{mrt}$  flutua amplamente em direção à radiação solar e ao ambiente circundante, o que pode não ser explicitamente imitado pelo ENVI-met, especialmente quando um modelo grosseiro é comparado com dados de referência mais finos. Fato esse, que pode ser observado nas simulações feitas neste estudo, criando cenários mais quentes para os índices de conforto como a adição da vegetação para o Modelo VEG, no período da manhã do dia 21/01.

Ainda em relação ao software é apontada a falta de vegetações validadas e específicas para áreas de clima subtropicais úmidos, uma vez que vegetações têm comportamentos diferentes em diferentes climas, com poucas opções para o clima Cfa.

Em todos os modelos vemos o uso inadequado de cobertura do solo, notado também por Zhao et al. (2014), os quais podem estar relacionados com a alteração nas temperaturas em relação às zonas do subúrbio ou rurais.

## 5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As limitações desta pesquisa estão conectadas principalmente ao recorte necessário, tais como:

- a) Não foi possível fazer medições *in loco* para calibração do índice PET, nem do modelo para a cidade de Florianópolis pelo momento pandêmico ocasionado pelo COVID-19.
- b) Não foi possível realizar questionários, não sendo possível incluir dados de caráter psicológicos na pesquisa.
- c) Foram usadas temperaturas do solo padrão do software por não haver dados do local de análise disponíveis.
- d) O software não considera os ganhos de calor de fontes antropogênicas.
- e) Não há vegetações específicas para o clima Cfa no banco de dados do ENVI-met versão 4.4.
- f) Não foi possível comprovar a superestimação da umidade do ar e a subestimação da temperatura do ar através de medições *in loco*, como apontado em outros estudos.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para que se possa obter mais resultados para uma melhor compreensão do sombreamento em áreas urbanas e a influência da vegetação no microclima da cidade são indicadas algumas recomendações para futuros trabalhos.

- a) Estudos com identificação de plantas nativas brasileiras para que seja possível identificar as propriedades com maior clareza e se tenha uma maior possibilidade de simulações.
- b) Calibração de diferentes vegetações para o software ENVI-met.
- c) Calibração do índice PET para a cidade de Florianópolis.

- d) Comparação com simulações em diferentes softwares de análise de conforto térmico externo.
- e) Aplicação de questionários e medição de dados meteorológicos locais para comparação dos resultados obtidos.
- f) Estudos referentes à qualidade do ar com a inserção ou a supressão de vegetação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOELATA, A. Assessment of green roof benefits on buildings' energy-saving by cooling outdoor spaces in different urban densities in arid cities. **Energy**, v. 219, p. 119514, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119514>

ABREU-HARBICH, L. V. de; LABAKI, L. C.; MATZARAKIS, A. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. **Landscape and Urban Planning**, v. 138, p. 99–109, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2015.02.008>

ABREU, L. V. **Estudo do raio de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas**. [S. l.]: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

ACERO, J. A.; KOH, E. J. Y.; LI, X. X.; RUEFENACHT, L. A.; PIGNATTA, G.; NORFORD, L. K. Thermal impact of the orientation and height of vertical greenery on pedestrians in a tropical area. **Building Simulation**, v. 12, n. 6, p. 973–984, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0537-1>

ADAM, E. **Inventário das espécies arbóreas na região central de Florianópolis com uso de sistema de informações geográficas**. Florianópolis: [s. n.], 2001.

AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 295–310, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)

ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. 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**, v. 41, n. 2, p. 94–108, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.01.013>

ALTUNKASA, C.; USLU, C. Use of outdoor microclimate simulation maps for a planting design to improve thermal comfort. **Sustainable Cities and Society**, v. 57, p. 102137, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102137>

ALVEY, A. A. Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 5, n. 4, p. 195–201, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.09.003>

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy. **ANSI/ASHRAE Standard - 55**, v. 7, p. 6, 2017.

ANTONIADIS, D.; KATSOULAS, N.; KITTAS, C. Simulation of schoolyard's microclimate and human thermal comfort under Mediterranean climate conditions: effects of trees and green structures. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, n. 11, p. 2025–2036, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1612-5>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220**

**Desempenho térmico de edificações - Parte 3. Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro, Brasil: [s. n.], 2005 a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**[S. l.: s. n.]

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16401-2:2008 Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 2. Parâmetros de conforto térmico.** Rio de Janeiro, Brasil: [s. n.], 2008.p. 7.

BARBOSA, G. S.; DRACH, P. R. C.; CORBELLA, O. D. Intraurban Temperature Variations: Urban Morphologies of the Densification Process of Copacabana Neighborhood, Brazil. **Climate**, v. 7, n. 5, p. 65, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cli7050065>

BERARDI, U. The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. **Energy and Buildings**, v. 121, p. 217–229, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>

BERNDTSSON, J. C. **Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review.** [S. l.]: Elsevier, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>

BEYER, K. M. M.; KALTENBACH, A.; SZABO, A.; BOGAR, S.; JAVIER NIETO, F.; MALECKI, K. M. Exposure to neighborhood green space and mental health: Evidence from the survey of the health of wisconsin. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 11, n. 3, p. 3453–3472, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph110303453>

BŁAZEJCZYK, K.; BROEDE, P.; FIALA, D.; HAVENITH, G.; HOLMÉR, I.; JENDRITZKY, G.; KAMPMANN, B.; KUNERT, A. Principles of the new universal thermal climate index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. **Miscellanea Geographica**, v. 14, p. 91–102, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>

BONAN, G. B. The microclimates of a suburban Colorado (USA) landscape and implications for planning and design. **Landscape and Urban Planning**, v. 49, n. 3–4, p. 97–114, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00071-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00071-2)

BRÖDE, P.; FIALA, D.; BŁAZEJCZYK, K.; HOLMÉR, I.; JENDRITZKY, G.; KAMPMANN, B.; TINZ, B.; HAVENITH, G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). **International Journal of Biometeorology**, v. 56, n. 3, p. 481–494, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>

BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling and Software**, v. 13, n. 3–4, p. 373–384, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)

CARIÑANOS, P.; CASARES-PORCEL, M.; QUESADA-RUBIO, J. M. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. **Landscape and Urban Planning**, v. 123, p. 134–144, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.009>

CARVALHO, R. M. de; SZLAFSZTEIN, C. F. Urban vegetation loss and ecosystem services: The influence on climate regulation and noise and air pollution. **Environmental Pollution**, v. 245, p. 844–852, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.114>

CASCONE, S.; CATANIA, F.; GAGLIANO, A.; SCIUTO, G. A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. **Building and Environment**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.052>

CASCONE, S.; COMA, J.; GAGLIANO, A.; PÉREZ, G. **The evapotranspiration process in green roofs: A review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>

CHEN, Y.-C.; LIN, T.-P.; MATZARAKIS, A. Comparison of mean radiant temperature from field experiment and modelling: a case study in Freiburg, Germany. **Theoretical and Applied Climatology** 2014 **118:3**, v. 118, n. 3, p. 535–551, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S00704-013-1081-Z>

COCCOLO, S.; KÄMPF, J.; SCARTEZZINI, J. L.; PEARLMUTTER, D. **Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.004>

DANDOU, A.; PAPANGELIS, G.; KONTOS; SANTAMOURIS, M.; TOMBROU, M. On the cooling potential of urban heating mitigation technologies in a coastal temperate city. **Landscape and Urban Planning**, v. 212, p. 104106, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104106>

DETOMMASO, M.; COSTANZO, V.; NOCERA, F. Application of weather data morphing for calibration of urban ENVI-met microclimate models. Results and critical issues. **Urban Climate**, v. 38, p. 100895, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2021.100895>

DIMOUDI, A.; NIKOLOPOULOU, M. Vegetation in the urban environment: Microclimatic analysis and benefits. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 1, p. 69–76, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)

DUARTE, D. H. S.; SHINZATO, P.; GUSSON, C. dos S.; ALVES, C. A. The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. **Urban Climate**, v. 14, p. 224–239, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.006>

**ENVI-met - Decode urban nature with ENVI-met software**. . [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.envi-met.com/>.

ERELL, E.; TSOAR, H. An experimental evaluation of strategies for reducing airborne dust in desert cities. **Building and Environment**, v. 32, n. 3, p. 225–236, 1997.

Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00060-1)

ERLWEIN, S.; ZÖLCH, T.; PAULEIT, S. Regulating the microclimate with urban green in densifying cities: Joint assessment on two scales. **Building and Environment**, v. 205, p. 108233, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108233>

ERREL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings - Evyatar Erell, David Pearlmutter, Terence Williamson**. [S. l.: s. n.]. E-book. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=eageBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=DRJuqy3FPJ&sig=PM8Fo-97mGCOCpnoK2Ypi5IPiu4&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=eageBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=DRJuqy3FPJ&sig=PM8Fo-97mGCOCpnoK2Ypi5IPiu4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

ESCOBEDO, F. J.; NOWAK, D. J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. **Landscape and Urban Planning**, v. 90, p. 102–110, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.021>

FANGER, P. O. **Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering**. [S. l.]: Copenhagen: Danish Technical Press., 1970.

FEITOSA, R. C.; WILKINSON, S. Modelling green roof stormwater response for different soil depths. **Landscape and Urban Planning**, v. 153, p. 170–179, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.007>

FEITOSA, R. C.; WILKINSON, S. J. Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit. **Building and Environment**, v. 140, p. 11–22, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.034>

FEITOSA, R. C.; WILKINSON, S. J.; OLIVEIRA, B.; HACON, S. Wind and greenery effects in attenuating heat stress: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 291, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125919>

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5. ed. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

FRUMKIN, H.; BRATMAN, G. N.; BRESLOW, S. J.; COCHRAN, B.; KAHN, P. H.; LAWLER, J. J.; LEVIN, P. S.; TANDON, P. S.; VARANASI, U.; WOLF, K. L.; WOOD, S. A. **Nature contact and human health: A research agenda**. [S. l.]: Public Health Services, US Dept of Health and Human Services, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/EHP1663>

GAGGE, A. P. The linearity criterion as applied to partitional calorimetry. **American Journal of Physiology-Legacy Content**, v. 116, n. 3, p. 656–668, 1936. Disponível em: <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1936.116.3.656>

GAGGE, A. P.; FOBELETS, A. P.; BERGLUND, L. G. **A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment**. [S. l.: s. n.].

GÁL, C. V.; KÁNTOR, N. Modeling mean radiant temperature in outdoor spaces, A comparative numerical simulation and validation study. **Urban Climate**, v. 32, p. 100571, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2019.100571>

GASPARI, J.; FABBRI, K.; LUCCHI, M. The use of outdoor microclimate analysis to support decision making process: Case study of Bufalini square in Cesena. **Sustainable Cities and Society**, v. 42, p. 206–215, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.07.015>

GATTO, E.; BUCCOLIERI, R.; AARREVAARA, E.; IPPOLITO, F.; EMMANUEL, R.; PERRONACE, L.; SANTIAGO, J. L. Impact of Urban vegetation on outdoor thermal comfort: Comparison between a Mediterranean city (Lecce, Italy) and a northern European city (Lahti, Finland). **Forests**, v. 11, n. 2, p. 228, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f11020228>

GIVONI, B. **Estimation of the Effect of Climate on Man: Development of a New Thermal Index**. Haifa: Technion-Israel Institute of Technology, 1963.

GIVONI, B.; NOGUCHI, M.; SAARONI, H.; POCHTER, O.; YAAKOV, Y.; FELLER, N.; BECKER, S. Outdoor comfort research issues. *In*: 2003, **Energy and Buildings**. : Elsevier, 2003. p. 77–86. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00082-8)

GOBO, J. P. A.; GALVANI, E.; WOLLMANN, C. A. Subjective Human Perception of Open Urban Spaces in the Brazilian Subtropical Climate: A First Approach. **Climate 2018, Vol. 6, Page 24**, v. 6, n. 2, p. 24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/CLI6020024>

GOULART, S. V. G. **Dados Climáticos para Avaliação de Desempenho Térmico em Florianópolis**. 124 f. Dissertação (Mestrado): Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. An evapotranspiration-interception model for urban areas. **Water Resources Research**, v. 27, n. 7, p. 1739–1755, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/91WR00557>

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E.; ALLMARAS, R. R. Predicting Soil Temperature and Soil Heat Flux under Different Tillage-Surface Residue Conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 2, p. 223–232, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020001x>

HAMDI, R.; KUSAKA, H.; DOAN, Q. Van; CAI, P.; HE, H.; LUO, G.; KUANG, W.; CALUWAERTS, S.; DUCHÊNE, F.; VAN SCHAEYBROEK, B.; TERMONIA, P. **The State-of-the-Art of Urban Climate Change Modeling and Observations**. [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00193-3>

HARTIG, T.; MITCHELL, R.; DE VRIES, S.; FRUMKIN, H. Nature and Health. **Annual Review of Public Health**, v. 35, n. 1, p. 207–228, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182443>

HIRASHIMA, S. Q. da S.; KATZSCHNER, A.; FERREIRA, D. G.; ASSIS, E. S. de; KATZSCHNER, L. Thermal comfort comparison and evaluation in different climates. **Urban Climate**, v. 23, p. 219–230, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2016.08.007>

HÖPPE, P. The physiological equivalent temperature - A universal index for the

biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, v. 43, n. 2, p. 71–75, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s004840050118>

HÖPPE, P. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *In*: 2002, **Energy and Buildings**. : Elsevier, 2002. p. 661–665. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8)

HUTTNER, S. **Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met**. Mainz: [s. n.], 2012.

INMET. **Relatórios de Dados Meteorológicos**. Florianópolis - SC: Estação Florianópolis A806, 2018.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 7726 - Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities**. Genève: International for Standardization, 1998.

JAVADI, R. Urban green space and health: The role of thermal comfort on the health benefits from the urban green space; a review study. **Building and Environment**, p. 108039, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108039>

JIM, C. Y.; PENG, L. L. H. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. **Ecological Engineering**, v. 47, p. 9–23, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.020>

JIM, C. Y.; TSANG, S. W. Ecological energetics of tropical intensive green roof. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2696–2704, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.018>

JOHANSSON, E.; EMMANUEL, R. The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. **International Journal of Biometeorology**, v. 51, n. 2, p. 119–133, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0047-6>

JOHANSSON, E.; THORSSON, S.; EMMANUEL, R.; KRÜGER, E. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - The need for standardization. **Urban Climate**, v. 10, n. P2, p. 346–366, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>

KÖHLER, M. Green facades-a view back and some visions. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, p. 423–436, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0063-x>

KOLOKOTSA, D.; SANTAMOURIS, M.; ZEREFOS, S. C. Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. **Solar Energy**, v. 95, p. 118–130, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.001>

KOTTEK, M.; JÜRGEN, G.; CHRISTOPH, B.; BRUNO, R.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, 2006. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>

KREBS, L. F.; JOHANSSON, E. Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil – A study coupling outdoor and indoor thermal simulations. **Energy and Buildings**, v. 241, p. 110963, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110963>

KRÜGER, E.; DRACH, P.; BROEDE, P. Outdoor comfort study in Rio de Janeiro: site-related context effects on reported thermal sensation. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 3, p. 463–475, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1226-8>

KRÜGER, E. L.; DRACH, P. Identifying potential effects from anthropometric variables on outdoor thermal comfort. **Building and Environment**, v. 117, p. 230–237, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.020>

KUO, F. E.; SULLIVAN, W. C. Environment and Crime in the Inner City: Does Vegetation Reduce Crime? **Environment & Behavior**, v. 33, n. 3, p. 343–367, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00139160121973025>

KUO, F. E.; SULLIVAN, W. C. Aggression and Violence in the Inner City: Effects of Environment via Mental Fatigue. <http://dx.doi.org/10.1177/00139160121973124>, v. 33, n. 4, p. 543–571, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00139160121973124>

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES/UFSC. **Design daysBrasil 2,5%**. [S. l.: s. n.]

LAI, D.; LIAN, Z.; LIU, W.; GUO, C.; LIU, W.; LIU, K.; CHEN, Q. **A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140092>

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. [S. l.: s. n.].

LAZZARIN, R. M.; CASTELLOTTI, F.; BUSATO, F. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 12, p. 1260–1267, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.02.001>

LEE, H.; MAYER, H.; CHEN, L. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. **Landscape and Urban Planning**, v. 148, p. 37–50, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2015.12.004>

LI, J.; ZHENG, B.; SHEN, W.; XIANG, Y.; CHEN, X.; QI, Z. Cooling and Energy-Saving Performance of Different Green Wall Design: A Simulation Study of a Block. **Energies** **2019**, Vol. 12, Page 2912, v. 12, n. 15, p. 2912, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/EN12152912>

LIU, Z.; BROWN, R. D.; ZHENG, S.; JIANG, Y.; ZHAO, L. An in-depth analysis of the effect of trees on human energy fluxes. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 50, p. 126646, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126646>

LIU, Z.; CHENG, W.; JIM, C. Y.; MORAKINYO, T. E.; SHI, Y.; NG, E. Heat

mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. **Building and Environment**, p. 107939, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107939>

LIU, Z.; ZHENG, S.; ZHAO, L. Evaluation of the ENVI-Met Vegetation Model of Four Common Tree Species in a Subtropical Hot-Humid Area. **Atmosphere** **2018**, Vol. **9**, Page **198**, v. 9, n. 5, p. 198, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ATMOS9050198>

LONTORFOS, V.; EFTHYMIU, C.; SANTAMOURIS, M. On the time varying mitigation performance of reflective geoengineering technologies in cities. **Renewable Energy**, v. 115, p. 926–930, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.033>

LUYMES, D. T.; TAMMINGA, K. Integrating public safety and use into planning urban greenways. **Landscape and Urban Planning**, v. 33, n. 1–3, p. 391–400, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(94\)02030-J](https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)02030-J)

MANSO, M.; CASTRO-GOMES, J. **Green wall systems: A review of their characteristics**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>

MASHAYEKHI, A.; HERAVI, G. A decision-making framework opted for smart building's equipment based on energy consumption and cost trade-off using BIM and MIS. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101653, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101653>

MATZARAKIS, A. Curiosities about Thermal Indices Estimation and Application. **Atmosphere** **2021**, Vol. **12**, Page **721**, v. 12, n. 6, p. 721, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ATMOS12060721>

MATZARAKIS, A.; MAYER, H. Another kind of environmental stress: Thermal stress. Alemanha, 1996

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology** **2006** **51:4**, v. 51, n. 4, p. 323–334, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S00484-006-0061-8>

MAYER, H.; HÖPPE, P. Thermal comfort of man in different urban environments. **Theoretical and Applied Climatology** **1987** **38:1**, v. 38, n. 1, p. 43–49, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00866252>

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? **Landscape and Urban Planning**, v. 77, n. 3, p. 217–226, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Programa Cidades+Verdes**. Brasil: [s. n.], 2021.

MÖLLER, M.; TANNY, J.; LI, Y.; COHEN, S. Measuring and predicting

evapotranspiration in an insect-proof screenhouse. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 127, n. 1–2, p. 35–51, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2004.08.002>

MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Thermal confort index for the assessment of outdoor urban spaces in subtropical climates. *In*: 2009, Yokohama. **The seventh Internacional Conference on Urban Climate**. Yokohama: [s. n.], 2009.

MORAKINYO, T. E.; KALANI, K. W. D.; DAHANAYAKE, C.; NG, E.; CHOW, C. L. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. **Energy and Buildings**, v. 145, p. 226–237, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.066>

MORAKINYO, T. E.; LAU, K. K. L.; REN, C.; NG, E. Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving. **Building and Environment**, v. 137, p. 157–170, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.012>

NG, E. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities - air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. **Building and Environment**, v. 44, n. 7, p. 1478–1488, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013>

NIKOLOPOULOU, M.; STEEMERS, K. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *In*: 2003, **Energy and Buildings**. : Elsevier, 2003. p. 95–101. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)

O'MALLEY, C.; PIROOZ FAR, P.; FARR, E. R. P.; POMPONI, F. Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis. **Sustainable Cities and Society**, v. 19, p. 222–235, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2015.05.009>

OKE, T. R. The micrometeorology of the urban forest. **Philosophical Transactions - Royal Society of London, B**, v. 324, n. 1223, p. 335–349, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.1989.0051>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Perspectivas de Urbanização Mundial: Revisão 2018, Edição Online**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Download/>.

OULD-DADA, Z. Dry deposition profile of small particles within a model spruce canopy. **Science of the Total Environment**, v. 286, n. 1–3, p. 83–96, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00965-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00965-2)

OUYANG, W.; SINSEL, T.; SIMON, H.; MORAKINYO, T. E.; LIU, H.; NG, E. Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met model for green infrastructure typologies: Experience from a subtropical climate. **Building and Environment**, v. 207, p. 108427, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108427>

PAYERO, J. O.; NEALE, C.; WRIGHT, J. L. Estimating soil heat flux for alfalfa and clipped tall fescue grass. *In*: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (org.). **Applied Engineering in Agriculture**. [S. l.: s. n.]. v. 21p. 401–410. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.5546>

PBMC. **Mudanças Climáticas e Cidades: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** (A. S. Ribeiro, Suzana Kahn; Santos, Org.). Rio de Janeiro, Brasil: [s. n.], 2016. Disponível em: <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/relatorios-especiais-pbmc/item/relatorio-especial-mudancas-climaticas-e-cidades>.

PEARLMUTTER, D.; BERLINER, P.; SHAVIV, E. Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. **Building and Environment**, v. 41, n. 6, p. 783–795, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.03.017>

PEARLMUTTER, D.; BERLINER, P.; SHAVIV, E. Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons. **Building and Environment**, v. 42, n. 6, p. 2396–2409, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.006>

PENG, L.; YIN, A.; SONG, W.; YAO, W.; REN, H.; YANG, L. Sleep Monitoring with Hidden Markov Model for Physical Conditions Tracking. **IEEE Sensors Journal**, p. 1–1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.3007153>

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and physical sciences**, v. 193, n. 1032, p. 120–145, 1948. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>

PENWARDEN, A. D. Acceptable wind speeds in towns. **Building Science**, v. 8, n. 3, p. 259–267, 1973. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(73\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0007-3628(73)90008-X)

PICKUP, J.; DEAR, R. de. An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT\_SET\*) - Part I - the model and its assumptions. *In: Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium*. Sydney: World Meteorological Organization, 2000. p. 279–283. *E-book*. Disponível em: <https://researchers.mq.edu.au/en/publications/an-outdoor-thermal-comfort-index-outset-part-i-the-model-and-its->

PINZI, S.; GARCIA, I. L.; LOPEZ-GIMENEZ, F. J.; CASTRO, M. D. L. de; DORADO, G.; DORADO, M. P. The Ideal Vegetable Oil-based Biodiesel Composition: A Review of Social, Economical and Technical Implications. **Energy and Fuels**, v. 23, n. 5, p. 2325–2341, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/EF801098A>

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Lei complementar nº 480, 20 de dezembro de 2013** Florianópolis: [s. n.], 2013. p. 9.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. Plano Diretor de Urbanismo do Município de Florianópolis. n. 48, 2014.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Lei Complementar nº 651, 23 de novembro de 2018** [S. l.: s. n.]. p. 1. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/sc/f/florianopolis/lei-complementar/2018/65/651/lei-complementar-n-651-2018-dispoe-sobre-a-instalacao-de-telhado-verde-ou-telhado-branco-nos-locais-que-especifica-e-da-outras-providencias>

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Geoprocessamento Corporativo**. [s. l.], 2021. Disponível em: <http://geo.pmf.sc.gov.br/>.

PRIYA, U. K.; SENTHIL, R. A review of the impact of the green landscape interventions on the urban microclimate of tropical areas. **Building and Environment**, v. 205, p. 108190, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108190>

RAHUL, A.; MUKHERJEE, M.; SOOD, A. Impact of ganga canal on thermal comfort in the city of Roorkee, India. **International Journal of Biometeorology**, v. 64, n. 11, p. 1933–1945, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01981-2>

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS, S. **Ecohouse: A Design Guide Oxford Auckland Boston Johannesburg Melbourne New Delhi**. [S. l.: s. n.].

RUI, L.; BUCCOLIERI, R.; GAO, Z.; GATTO, E.; DING, W. Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. **Building Simulation 2018 12:2**, v. 12, n. 2, p. 183–194, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S12273-018-0498-9>

SAADATIAN, O.; SOPIAN, K.; SALLEH, E.; LIM, C. H.; RIFFAT, S.; SAADATIAN, E.; TOUDESHEKI, A.; SULAIMAN, M. Y. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 155–168, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, v. 103, p. 682–703, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>

SANTAMOURIS, M. **Regulating the damaged thermostat of the cities - Status, impacts and mitigation challenges**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.027>

SANTOS, T.; SILVA, C.; TENEDÓRIO, J. A. Promoting citizens' quality of life through green urban planning. In: 2019, **Communications in Computer and Information Science**. : Springer Verlag, 2019. p. 153–175. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-06010-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-06010-7_10)

SHASHUA-BAR, L.; PEARLMUTTER, D.; ERELL, E. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. **Landscape and Urban Planning**, v. 92, n. 3–4, p. 179–186, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>

SHASHUA-BAR, L.; PEARLMUTTER, D.; ERELL, E. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 10, p. 1498–1506, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.2177>

SHINZATO, P.; DUARTE, D. **Microclimatic Effect of Vegetation for Different Leaf Area Index-LAI**. Perú: PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture Lima, 2012. Disponível em: <http://www.systat.com/products/SigmaScan/>

SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera.

**Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 197–215, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200250>

SIMON, H. **Modeling urban microclimate : development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met**. 2016. - Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz, 2016. Disponível em: <https://doi.org/http://doi.org/10.25358/openscience-4042>

SIMON, H.; SINSEL, T.; BRUSE, M. Introduction of fractal-based tree digitalization and accurate in-canopy radiation transfer modelling to the microclimate model ENVI-met. **Forests**, v. 11, n. 8, p. 869, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f11080869>

SNIR, K.; PEARLMUTTER, D.; ERELL, E. The moderating effect of water-efficient ground cover vegetation on pedestrian thermal stress. **Landscape and Urban Planning**, v. 152, p. 1–12, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.008>

SOUSA-SILVA, R.; SMARGIASSI, A.; KNEESHAW, D.; DUPRAS, J.; ZINSZER, K.; PAQUETTE, A. Strong variations in urban allergenicity riskscape due to poor knowledge of tree pollen allergenic potential. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–13, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89353-7>

SÖZEN, İ.; KOÇLAR ORAL, G. Outdoor thermal comfort in urban canyon and courtyard in hot arid climate: A parametric study based on the vernacular settlement of Mardin. **Sustainable Cities and Society**, v. 48, p. 101398, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.12.026>

STAIGER, H.; LASCHEWSKI, G.; GRÄTZ, A. The perceived temperature – a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. **International Journal of Biometeorology** 2011 **56:1**, v. 56, n. 1, p. 165–176, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S00484-011-0409-6>

STAIGER, H.; LASCHEWSKI, G.; MATZARAKIS, A. Selection of Appropriate Thermal Indices for Applications in Human Biometeorological Studies. **Atmosphere** 2019, **Vol. 10, Page 18**, v. 10, n. 1, p. 18, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ATMOS10010018>

TAHA, H. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 99–103, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)00999-1)

TAN, Z.; LAU, K. K. L.; NG, E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 265–274, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.031>

TEEB. **The Economics of Ecosystems and Biodiversity - TEEB for Business**. London and New York: [s. n.], 2010.

THEODOSIOU, T. G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 9, p. 909–917, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00023-9)

TSOKA, S.; TSIKALOUDAKI, A.; THEODOSIOU, T. **Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>

VIECCO, M.; JORQUERA, H.; SHARMA, A.; BUSTAMANTE, W.; FERNANDO, H. J. S.; VERA, S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. **Building and Environment**, v. 204, p. 108120, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108120>

VIJAYARAGHAVAN, K. **Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>

WAMSLER, C. **Cities , Disaster Risk and Adaptation.** Londres: Routledge, 2014.

WANG, Y.; AKBARI, H. The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. **Sustainable Cities and Society**, v. 27, p. 122–128, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.013>

WANG, Y.; NI, Z.; CHEN, S.; XIA, B. Microclimate regulation and energy saving potential from different urban green infrastructures in a subtropical city. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 913–927, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.114>

WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. Urban green spaces and health. p. 92, 2016.

XIE, Y.; LIU, J.; HUANG, T.; LI, J.; NIU, J.; MAK, C. M.; LEE, T. cheung. Outdoor thermal sensation and logistic regression analysis of comfort range of meteorological parameters in Hong Kong. **Building and Environment**, v. 155, p. 175–186, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.035>

YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. **Building and Environment**, v. 60, p. 93–104, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2012.11.008>

YANG, Y.; GATTO, E.; GAO, Z.; BUCCOLIERI, R.; MORAKINYO, T. E.; LAN, H. **The “plant evaluation model” for the assessment of the impact of vegetation on outdoor microclimate in the urban environment.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.029>

YEOM, S.; KIM, H.; HONG, T. Psychological and physiological effects of a green wall on occupants: A cross-over study in virtual reality. **Building and Environment**, v. 204, p. 108134, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108134>

ZHAO, L.; LEE, X.; SMITH, R. B.; OLESON, K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. **Nature**, v. 511, n. 7508, p. 216–219, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature13462>

ZHAO, Q.; SAILOR, D. J.; WENTZ, E. A. Impact of tree locations and arrangements

on outdoor microclimates and human thermal comfort in an urban residential environment. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 32, p. 81–91, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2018.03.022>

ZHENG, S.; ZHAO, L.; LI, Q. Numerical simulation of the impact of different vegetation species on the outdoor thermal environment. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 18, p. 138–150, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2016.05.008>