

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO E  
PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL

VLADIMIR SOBRAL DE SOUZA

**ANÁLISE ESPACIAL DO ESTRESSE TÉRMICO HUMANO EM MOMENTO DE  
ONDA DE CALOR: modelagem multiescala em cidade costeira de baixa latitude**

BELO HORIZONTE

2024

VLADIMIR SOBRAL DE SOUZA

**ANÁLISE ESPACIAL DO ESTRESSE TÉRMICO HUMANO EM MOMENTO DE  
ONDA DE CALOR: modelagem multiescala em cidade costeira de baixa latitude**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável.

Linha de Pesquisa: Tecnologia do Ambiente Construído

Orientadora: Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis

Coorientadora: Profa. Dra. Taciana Toledo de Almeida Albuquerque

BELO HORIZONTE

2024

## FICHA CATALOGRÁFICA

S729a

Souza, Vladimir Sobral de.

Análise espacial do estresse térmico humano em momento de onda de calor [recurso eletrônico] : modelagem multiescala em cidade costeira de baixa latitude / Vladimir Sobral de Souza. - 2024.

1 recurso eletrônico (215 f. : il.), pdf.

Orientadora: Eleonora Sad de Assis.

Coorientadora: Taciana Toledo de Almeida Albuquerque.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Climatologia urbana - Teses. 2. Conforto térmico - Teses. 3. João Pessoa (PB) - Teses. I. Assis, Eleonora Sad de. II. Albuquerque, Taciana Toledo de Almeida. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. IV. Título.

CDD 720.47



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**"ANÁLISE ESPACIAL DO ESTRESSE TÉRMICO HUMANO EM MOMENTO DE ONDA DE CALOR:  
modelagem multiescala em cidade costeira de baixa latitude"**

**VLADIMIR SOBRAL DE SOUZA**

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **dezesseis de dezembro de dois mil e vinte e quatro**, pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

**Profa. Dra. Taciana Toledo de Almeida Albuquerque** - Coorientadora

Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária/UFMG

**Prof. Dr. Lutz Katzschner**

Universidade de Kassel/Univ. Kassel

**Prof. Dr. Marco Túlio Mendonça Diniz**

Departamento de Geografia/UFRN

**Profa. Dra. Simone Queiroz da Silveira Hirashima**

Departamento de Engenharia Civil/CEFET-MG

**Prof. Dr. Helber Barros Gomes**

Instituto de Ciências Atmosféricas/UFAL

Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Helber Barros Gomes, Usuário Externo**, em 17/12/2024, às 21:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Simone Queiroz da Silveira Hirashima, Usuária Externa**, em 18/12/2024, às 10:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Taciana Toledo de Almeida Albuquerque, Professora do Magistério Superior**, em 19/12/2024, às 14:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Túlio Mendonça Diniz, Usuário Externo**, em 02/01/2025, às 09:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lutz Frieder Katschner, Usuário Externo**, em 05/02/2025, às 18:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3832983** e o código CRC **4BB4B829**.

À Elaine, Eric e Otto, minha vida.

## AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. **Eleonora Sad de Assis**, pela forma que me conduziu ao longo deste trabalho, com muita compreensão, paciência, carinho e sabedoria.

Ao Prof. Dr. **Lutz Katzschner**, pelas valiosas orientações e ensinamentos, sempre com simplicidade, paciência e objetividade.

À Profa. Dra. **Taciana Toledo de Almeida Albuquerque**, pelas orientações e viabilidade de uso do modelo WRF.

Ao Prof. Dr. **Rizzieri Pedrucci**, pelas simulações finais no modelo WRF no Grupo de Pesquisa em Poluição do Ar e Meteorologia Aplicada (GPama) da Escola de Engenharia da UFMG.

À Profa. Dra. **Simone Queiroz da Silveira Hirashima**, pelos trabalhos em conjunto e pelas suas contribuições nesta pesquisa.

Ao Prof. Dr. **João Carlos Machado Sanches**, pelas prosas e companheirismo no Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética no Ambiente Construído da Escola de Arquitetura da UFMG.

Ao **Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável** (PACPS) da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, pelo conhecimento adquirido e apoio nas viagens realizadas a eventos científicos.

Aos professores Dr. **Matthias Demuzere** e **Benjamin Bechtel**, pela atenção e trocas de experiências no evento Bochum Urban Climate Summer School 2022.

Ao **National Center for Atmospheric Research** (NCAR) pela prática adquirida com o modelo WRF.

À **International Association for Urban Climate** (IAUC) pelo apoio à viagem ao 11° International Conference on Urban Climate.

À minha amada irmã, **Tatiana Sobral**, e meu querido cunhado, **Fernando Julião**, pelo apoio constante e pela disponibilização de recursos computacionais necessários às simulações no modelo WRF.

À querida **Aurora Maria Figueiredo Coelho Costa**, tia Lola, pelas suas palavras cheias de motivação, que sempre renovaram minhas energias.

A todos os meus **familiares** e **amigos**, que com seus risos, abraços e torcidas me deram forças para que eu chegasse até aqui.

À minha **amada família**, que me deu todo o suporte necessário a realização deste doutorado.

E a **Deus**, por tornar possível esta jornada e por todas as incríveis experiências vividas.

O meu muito obrigado a todos!!

“As componentes termodinâmicas do clima não só conduzem ao referencial básico para a noção de conforto térmico como são, antes de tudo, a constituição do nível fundamental de resolução climática para onde convergem e se associam todas as outras componentes” (MONTEIRO, 1975, p. 163).

## RESUMO

Ondas de Calor são fenômenos meteorológicos esporádicos, caracterizados pela elevação da temperatura do ar em uma grande área e que provocam, geralmente, elevado estresse térmico nas populações urbanas. Além disso, características morfológicas e térmicas da superfície urbana podem intensificar a elevação da temperatura do ar. No Brasil, em especial no Nordeste brasileiro, o aumento na duração e frequência destes eventos extremos de calor é comprovado por vários estudos, porém são escassas as pesquisas que demonstrem o impacto de ondas de calor no estresse térmico humano em escala de cidade, considerando aspectos microclimáticos, urbanos e humanos. Dentro deste contexto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a variabilidade espacial do estresse térmico humano decorrente de uma onda de calor, na cidade de João Pessoa, por meio do mapeamento em alta resolução espacial do índice de conforto térmico PET. O método proposto se utiliza da identificação de ondas de calor com base em informações de temperatura máxima e mínima do ar (limiar combinado) e de modelagem numérica de mesoescala e microescala, realizados nos modelos WRF e UMEP, respectivamente, para estimar os dados meteorológicos e espaciais necessários aos cálculos do índice PET em microescala. Ao considerar a série histórica de 2010 a 2023, esta pesquisa identificou a ocorrência de eventos extremos de calor ao longo do período de estudo, com duração média de 3,8 dias, frequência de 1,45 eventos por ano e intensidade média de 1,37 °C. Durante um estudo de caso de OC, o modelo de mesoescala WRF indicou que a temperatura (°C) e a umidade relativa (%) apresentaram gradientes de 2,29 °C e 19,21 pontos percentuais, respectivamente, sobre o território da cidade. No entanto, os resultados do modelo microclimático UMEP indicaram altos valores médios de temperatura radiante média (acima de 40 °C) e zonas de estagnação de ventos em bairros da cidade, que impactaram negativamente o conforto térmico em áreas da cidade. Os dados do mapeamento do índice PET (°C) revelaram uma elevada amplitude térmica sobre João Pessoa (15,06°C) em dia de calor extremo, com um valor máximo de 41,95°C. Esses resultados demonstram que, durante uma Onda de Calor, diferentes padrões de uso e ocupação do solo urbano em João Pessoa podem intensificar o estresse térmico da população, mesmo em áreas onde não foram observados os maiores valores de temperatura do ar. Por fim, com base nos dados do censo de 2022, identificou-se que 34,58% da população local habita setores com elevado grau de estresse térmico positivo. A identificação de áreas mais suscetíveis ao calor extremo causados por Ondas de Calor é uma informação fundamental para que gestores e produtores do espaço urbano tornem as cidades mais resilientes e protejam a saúde da população frente a eventos extremos de calor mais frequentes e extremos.

**Palavras-chave:** onda de calor; modelagem numérica; estresse térmico; índice PET.

## ABSTRACT

Heatwaves are sporadic meteorological phenomena characterized by an increase in air temperature over a large area, generally causing high thermal stress in urban populations. Additionally, the morphological and thermal characteristics of the urban surface can intensify the rise in air temperature. In Brazil, particularly in the Northeast region, the increasing duration and frequency of these extreme heat events have been documented by several studies. However, research on the impact of heatwaves on human thermal stress at the city scale, considering microclimatic, urban, and human aspects, remains scarce. Within this context, this research aims to assess the spatial variability of human thermal stress resulting from a heatwave in the city of João Pessoa through high-resolution mapping of the PET thermal comfort index. The proposed method identifies heatwaves based on maximum and minimum air temperature data (combined threshold) and employs numerical modeling at mesoscale and microscale, using the WRF and UMEP models, respectively, to estimate the meteorological and spatial data required for PET index calculations at the microscale. By analyzing the historical series from 2010 to 2023, this study identified the occurrence of extreme heat events over the study period, with an average duration of 3.8 days, a frequency of 1.45 events per year, and an average intensity of 1.37°C. During a case study of a heat wave, the mesoscale WRF model indicated that air temperature (°C) and relative humidity (%) showed gradients of 2.29°C and 19.21 percentage points, respectively, across the city. However, the results of the UMEP microclimatic model revealed high average values of mean radiant temperature (above 40°C) and areas of wind stagnation in some neighborhoods, negatively impacting thermal comfort in parts of the city. The PET (°C) index mapping data revealed a high thermal amplitude over João Pessoa (15.06°C) on extreme heat days, with a maximum value of 41.95°C. These findings indicate that, during a heatwave, different patterns of urban land use and occupation in João Pessoa can intensify population thermal stress, even in areas where the highest air temperature values were not observed. Finally, based on the 2022 census data, it was found that 34.58% of the local population resides in sectors with a high degree of positive thermal stress. Identifying areas most susceptible to extreme heat caused by heat waves is crucial for urban planners and policymakers to enhance city resilience and protect public health against increasingly frequent and intense extreme heat events.

**Keywords:** heatwave; numerical modeling; thermal stress; PET index.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tendências anuais observadas dos extremos de temperatura no Brasil.....	24
Figura 2 -Esquema de métricas de OCs adaptado de Perkins, 2015. ....	34
Figura 3 - Comparação da UHI de superfície diurna e noturna em Bucareste, Romênia. ....	37
Figura 4 - Processos físicos que contribuem com a formação de OC em latitudes médias..	38
Figura 5 - Esquema dos componentes do balanço de energia de superfície urbano.....	42
Figura 6 - Efeitos da forma urbana nos valores do albedo sobre uma mesma área.....	47
Figura 7 – Média horária espacial de QE, QH e $\Delta$ QS em períodos pré, durante e pós-OC..	50
Figura 8 – Área de trabalho do modelo microclimático Rayman Pro. ....	58
Figura 9 - Coleção de aplicativos do ENVI_met (v. 5.02) e área de trabalho. ....	59
Figura 10 - Mapas das variáveis climáticas e do PET obtidas por LAI et al., 2016.....	65
Figura 11 - Estrutura do Modelo WRF-ARW .....	67
Figura 12 - Aninhamento de grade e uso e ocupação do solo .....	69
Figura 13 - Estrutura do modelo UMEP segundo Lindberg et al., 2019.....	72
Figura 14 - Esquema simplificado do cálculo da TRM (°C) pelo módulo SOLWEIG.....	74
Figura 15 - Oito zonas utilizadas pelo URock para inicialização do campo eólico.....	75
Figura 16 - Mapa de localização da cidade de João Pessoa.....	77
Figura 17 - Mapa das regiões orçamentárias e bairros da cidade de João Pessoa.....	78
Figura 18 - Mapa de hidrografia da cidade de João Pessoa .....	83
Figura 19 - Mapa hipsométrico da cidade de João Pessoa .....	84
Figura 20 - Mapa de ZPAs e UCs da cidade de João Pessoa.....	85
Figura 21 - Mapa climático urbano da cidade de João Pessoa .....	86
Figura 22 - Informações das estações meteorológicas utilizadas na pesquisa.....	90
Figura 23 - Domínios utilizados no modelo WRF. ....	95
Figura 24 – Representação dos pontos selecionados para cálculo no Rayman Pro. ....	104
Figura 25 – Gráficos de Man-Kendall para Tmax (°C), Tmin (°C) , Vvel. (m/s) e UR (%). ...	109
Figura 26 – Variação diária de T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s) modelado e observado. ...	119
Figura 27 – Variação diária da RAD (W/m <sup>2</sup> ) modelado (WRF) e observado (OBS).....	121
Figura 28 – Mapa de T2 (°C) para o dia 13/04/20 às 16h UTC. ....	122
Figura 29 – Mapa de rh2 (%) para o dia 13/04/20 às 16h UTC.....	124
Figura 30 – Radiação global (W/m <sup>2</sup> ) para o dia 13/04/20 às 16h UTC. ....	126
Figura 31 – Mapa de fluxo de calor sensível (W/m <sup>2</sup> ) em 13/04/2020 às 16h. ....	127
Figura 32 – Mapa de fluxo de calor latente (W/m <sup>2</sup> ) em 13/04/2020 às 16h. ....	128
Figura 33 – Mapa de TRM (°C) da área urbana de João Pessoa – 13/04/20 às 16h UTC. ...	133
Figura 34 – Representação dos perfis de velocidade (João Pessoa).....	139
Figura 35 – Mapa de WSPEED (m/s) de João Pessoa para o dia 13/04/20 às 16H UTC. .	141

Figura 36 – Figura de erosão elaborada por Peregrino (2006) e modelagem no UMEP. ...	142
Figura 37 - Mapa de PET (°C) da área urbana de João Pessoa - 13/04/20 às 16h UTC....	146
Figura 38 - Imagem aérea do parque Arruda Câmara e fração do Mapa de PET (°C). .....	147
Figura 39 - Gráficos de dispersão da regressão entre PET (°C) e parâmetros urbanos.....	150
Figura 40 - Cartogramas de I de Moran dos cinco parâmetros urbanos e do índice PET...	154
Figura 41 - Mapa de Setores Censitários da cidade com as classes de sensação térmica.	159
Figura 42 - Mapa hipsométrico de João Pessoa baseado no produto ALOS PALSAR.....	194
Figura 43 - Mapa de edifícios da cidade de João Pessoa .....	195
Figura 44 - Mapa de árvores urbanas da cidade de João Pessoa.....	196
Figura 45 - Mapa de tipo de cobertura do solo da área urbana de João Pessoa.....	197

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura do ar máxima, média e mínima mensal e anual (°C) .....	80
Gráfico 2 - Umidade relativa do ar compensada e precipitação acumulada (mm) mensal. ...	81
Gráfico 3 - Normais da Velocidade e direção resultante mensal e anual dos ventos .....	81
Gráfico 4 - Excedente, retirada, reposição e deficiência hídrica da cidade.....	82
Gráfico 5 – Número de eventos com 3 dias ou mais por ano na estação 82798.....	110
Gráfico 6 – Número de eventos com 3 dias ou mais por ano na estação 82798.....	111
Gráfico 7 – Número de eventos com 3 dias ou mais por ano na estação A320.....	112
Gráfico 8 – <i>Box plot</i> dos valores de TRM (°C) de diferentes superfícies. ....	136
Gráfico 9 - Gráfico de dispersão dos dados do SpatialTc e Rayman Pro .....	145
Gráfico 10 - <i>Box plot</i> de bairros da cidade em função do índice PET (°C). ....	148
Gráfico 11 - <i>Box plots</i> do índice PET (°C) por clusters dos parâmetros urbanos.....	155
Gráfico 12 - <i>Box plots</i> dos valores de PET segundo classes de LCZs.....	157
Gráfico 13 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação 82798) ...	202
Gráfico 14 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação 82800) ...	203
Gráfico 15 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação A320) .....	203
Gráfico 16 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação 82798) ...	204
Gráfico 17 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação 82800) ...	204
Gráfico 18 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação A320).....	205
Gráfico 19 - Variação diária de WSP10 modelado (WRF) e observado (estação 82798)...	205
Gráfico 20 - Variação diária de WSP10 modelado (WRF) e observado (estação 82798)...	206
Gráfico 21 - Variação diária de WSP10 modelado (WRF) e observado (estação A320) ....	206
Gráfico 22 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação 82798) ...	208
Gráfico 23 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação 82800) ...	209
Gráfico 24 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação A320) .....	209
Gráfico 25 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação 82798) ...	210
Gráfico 26 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação 82800) ...	210
Gráfico 27 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação A320).....	211
Gráfico 28 - Variação diária de WSP10 modelado (WRF) e observado (estação 82798)...	211
Gráfico 29 - Variação diária de WSP10 modelado (WRF) e observado (estação 82798)...	212
Gráfico 30 - Variação diária de WSP10 modelado (WRF) e observado (estação A320) ....	212

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Escala do índice PET proposto por Matzarakis et al. (1999) .....	55
Quadro 2 - Escalas do índice PET propostos por estudos brasileiros. ....	56
Quadro 3 - Interpretações dos valores do coeficiente de correlação de Spearman.....	92
Quadro 4 - Configuração de grid utilizados no modelo WRF.....	96
Quadro 5 - Esquemas de parametrizações utilizados no modelo WRF.....	97
Quadro 6 - Índices estatísticos e valores de referência.....	98
Quadro 7 - Variáveis incluídas como dados meteorológicos de entrada no UMEP. ....	99
Quadro 8 - Dados espaciais utilizados na pesquisa.....	100
Quadro 9 - Parâmetros de configuração utilizados no modelo UMEP.....	103
Quadro 10 – Critérios do teste de Mann-Kendall para as variáveis avaliadas .....	108
Quadro 11 - Percentual de áreas urbanas com base no intervalo de sensação térmica. ...	158
Quadro 12 - Dados dos atributos climáticos dos eventos EV01, EV02, EV03 e EV04. ....	190

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual do número de dias de OC segundo diferente limiares.....	29
Tabela 2 - Propriedades radiativas de materiais urbanos .....	46
Tabela 3 - Influência da velocidade do vento no índice PET calculado no modelo Rayman.	54
Tabela 4 - Parametrizações disponíveis no modelo WRF (ARW), versão 4.5.....	70
Tabela 5 – Número de dados meteorológicos não registrados por estação meteorológica	106
Tabela 6 – Estatística descritiva dos atributos climáticos da série temporal.....	107
Tabela 7 – Matriz de correlação de Spearman.....	108
Tabela 8 – Médias dos dados meteorológicos por período de evento da estação 82798...	113
Tabela 9 – Média dos dados meteorológicos por período de evento da estação 82800 ....	114
Tabela 10 – Média das variáveis meteorológicas por período de evento estação A320.....	114
Tabela 11 – Resultados estatísticos para T2, rh2 e WSP10 do conjunto S1 .....	116
Tabela 12 – Resultados estatísticos para T2, rh2 e WSP10 do conjunto S2 .....	118
Tabela 13 – Comparativo entre os valores de T2 modelados (A) e de Santos (2011) (B)..	123
Tabela 14 – Comparativo entre valores de rh2 modelados (A) e de Santos (2011) (B).....	125
Tabela 15 – Dados de vento das três estações meteorológicas da RMJP para 13/04/20. .	139
Tabela 16 - Resultado do teste de correlação de Spearman entre as variáveis. ....	149
Tabela 17 - Resultado do relatório <i>Exploratory Regression</i> das variáveis independentes..	151
Tabela 18 - Sumário do índice global de Moran.....	152
Tabela 19 - Características das Ondas de Calor identificadas na estação 82798 .....	198
Tabela 20 - Características das Ondas de Calor identificadas na estação 82800 .....	198
Tabela 21 - Características das Ondas de Calor identificadas na estação A320.....	199
Tabela 22 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV01 .....	201
Tabela 23 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV02 .....	201
Tabela 24 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV03 .....	202
Tabela 25 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV01 .....	207
Tabela 26 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV02 .....	207
Tabela 27 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV03 .....	208
Tabela 28- Valores de parâmetros climáticos por bairro - 13/04/20 às 16h UTC.....	213
Tabela 29 - Dados meteorológicos utilizados na validação do modelo SpatialTC .....	215

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$ -	albedo
$\bar{I}$ -	intensidade média de uma onda de calor ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\overline{I_m}$ -	intensidade média de todas as ondas de calor de uma série ( $^{\circ}\text{C}$ )
D -	duração de um episódio de onda de calor (dias)
$\varepsilon$ -	emissividade
F -	número mensal de episódios de ondas de calor
h -	altura dos edifícios (m)
H/W -	razão de aspecto do cânion urbano (relação entre a altura do cânion urbano e a largura das vias)
N -	número anual de episódios de ondas de calor
Prec -	precipitação (mm)
$Q^*$ -	fluxo líquido de radiação, proveniente do sol e da atmosfera ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
QE -	fluxo de calor latente ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
QF -	liberações do calor antropogênico ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
QH -	fluxo de calor sensível ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
QI -	radiação solar de onda curta incidente ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
QL -	radiação solar de onda longa incidente ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
RAD -	radiação solar global ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
rh2 -	umidade relativa do ar a 2 m (%)
$\Sigma$ -	Somatório
Ta -	temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )
Tas -	taxa de ascensão ( $^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ )
Td -	taxa de declínio ( $^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ )
Tmax -	temperatura máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )
Tmin -	temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )
T2 -	temperatura do ar a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ )
UR -	umidade relativa do ar (%)
Vdir. -	direção do vento (graus)
Vvel. -	velocidade do vento (m/s)

$\Delta QA$	advecção horizontal de energia ( $W/m^2$ )
$\Delta QS$ -	fluxo líquido de calor armazenado em um volume ( $W/m^2$ )
$\lambda_c$ -	proporção da área de todas as superfícies dos edifícios
WSP10 -	velocidade dos ventos a 10 m (m/s)
% -	Porcentagem
$^{\circ}C$ -	Graus Celsius

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b>	20
2.	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	27
2.1.	<b>ONDAS DE CALOR</b>	27
2.1.1.	Definições e métricas de Ondas de Calor	27
2.1.2.	Impactos das Ondas de Calor	34
2.1.3.	Processos físicos envolvidos na formação de Ondas de Calor	37
2.2.	<b>BALANÇO DE ENERGIA DE SUPERFÍCIE URBANO</b>	41
2.2.1.	Componentes do balanço de energia	41
2.2.2.	Influência das Ondas de Calor no balanço de energia de superfície	48
2.3.	<b>ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO PET</b>	51
2.3.1.	Parâmetros do índice PET	51
2.3.2.	Escala de conforto e sensação térmica do índice PET (°C)	55
2.3.3.	Estimativa do PET por modelagem numérica	57
3.	<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b>	60
3.1.	Aplicação do modelo WRF no estudo de Ondas de Calor	60
3.2.	Mapeamento do índice PET (°C) em escala de cidade	64
4.	<b>DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS</b>	67
4.1.	Modelo atmosférico de mesoescala WRF	67
4.2.	Preditor ambiental UMEP	71
5.	<b>UNIVERSO DE ANÁLISE</b>	77
6.	<b>METODOLOGIA</b>	88
6.1.	Características do método	88
6.2.	Descrição dos procedimentos metodológicos	89
6.2.1.	Abordagem meteorológica	89
6.2.2.	Abordagem climática urbana	99
6.2.3.	Abordagem biometeorológica humana	102
7.	<b>RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES</b>	106
7.1.	<b>ABORDAGEM METEOROLÓGICA</b>	106
7.1.1.	Imputação de dados não registrados pelas estações meteorológicas	106
7.1.2.	Estatística descritiva dos dados meteorológicos	106
7.1.3.	Características das Ondas de Calor da cidade de João Pessoa	109
7.1.4.	Análise dos dados meteorológicos para os quatro estudos de caso	112
7.1.5.	Validação dos resultados modelo WRF	115
7.1.6.	Variação diária dos dados modelados pelo WRF do EV02	118
7.1.7.	Análise horizontal dos dados modelados pelo WRF do EV02	121

7.1.8. Considerações sobre os resultados da abordagem meteorológica.....	129
<b>7.2. ABORDAGEM CLIMÁTICA URBANA.....</b>	<b>132</b>
7.2.1. Análise espacial da TRM (°C) e WSPEED (m/s) sobre a área de estudo .....	132
7.2.2. Considerações sobre os resultados da abordagem climática urbana .....	143
<b>7.3. ABORDAGEM BIOMETEOROLÓGICA HUMANA.....</b>	<b>144</b>
7.3.1. Validação dos dados do módulo SpatialTC (UMEP).....	144
7.3.2. Mapeamento do índice PET (°C) da cidade de João Pessoa .....	145
7.3.3. Análise estatística descritiva dos dados do mapa de PET (°C) .....	147
7.3.4. Relação entre o índice PET (°C) e os parâmetros urbanos .....	149
7.3.5. Análise exploratória espacial aplicada às variáveis de estudo.....	151
7.3.6. Impacto das LCZs nos valores de PET (°C).....	156
7.3.7. Áreas urbanas segundo faixas de estresse térmico .....	157
7.3.8. Considerações sobre os resultados da abordagem biometeorológica humana.....	160
<b>8. CONCLUSÃO.....</b>	<b>163</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>168</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>187</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### CONTEXTO DA PESQUISA

A exposição da população urbana ao calor extremo tem se agravado nas últimas décadas, decorrente de fenômenos térmicos locais, como a Ilha de Calor Urbana, e de efeitos adversos do aquecimento global (MARX et al., 2021; LI et al., 2024). Parte desse estresse térmico se deve à ocorrência de eventos climáticos extremos denominados **Ondas de Calor** atmosféricas (OC), que são fenômenos meteorológicos esporádicos, caracterizados pela elevação da temperatura do ar em uma grande área e que podem durar dias ou semanas (WMO-N° 1310, 2023). Com o aumento da frequência e intensidade desses eventos climáticos, as populações urbanas enfrentam riscos crescentes, resultantes de seus impactos diretos e indiretos (FERON et al., 2020; YANG et al., 2020; PERKINS-KIRKPATRICK, LEWIS, 2020).

De forma direta, a exposição prolongada do corpo humano ao calor extremo tem grande impacto na fisiologia humana, que pode resultar no surgimento de doenças relacionadas ao calor ou, nos casos mais severos, em quadros de disfunção multiorgânica (MCGREGOR, 2015; BASARIN et al., 2020). De forma indireta, os períodos de calor extremo podem elevar o consumo de energia e água, deteriorar estruturas construídas, sobrecarregar sistemas de saúde, provocar incêndios florestais e intensificar reações fotoquímicas responsáveis pela produção de poluentes atmosféricos (ARKELL, DARCH, 2006; MCEVOY et al., 2012; WANG et al., 2012; GULERIA, GUPTA, 2018; HANSEN et al., 2022; LIBONATI et al., 2022).

A elevação da temperatura do ar no ambiente urbano durante episódios de Ondas de Calor é geralmente atribuída a padrões persistentes de circulação atmosférica de larga escala (DOMEISEN et al., 2022), que intensificam a entrada de radiação solar no ambiente urbano, e de características morfológicas e térmicas da superfície que acentuam os fluxos de energia (PERKINS-KIRKPATRICK et al., 2016). O armazenamento e transferência de calor decorrente desses fluxos determinam o **Balço de Energia de Superfície** (*Surface Energy Balance*, SEB em inglês), componente fundamental do clima urbano e referencial básico para a compreensão do conforto térmico (OKE et al., 2017). Assim, os altos valores de temperatura do ar registrados durante dias e/ou noites em cidades decorrentes de uma OC é uma

resposta dos fluxos de energia, que levam a população a experimentar uma alta carga térmica nas cidades (WANG et al., 2019).

No Brasil, pesquisas que se propõem a avaliar o impacto das OC no estresse térmico de populações urbanas empregam dados de temperatura do ar, umidade relativa ou índices de estresse, que também são baseados nestas duas variáveis meteorológicas (MOURA, 2013; SILVEIRA, SANT'ANNA NETO, 2015; DINIZ, 2022; MORAES et al., 2022). Embora esses estudos tenham trazido valiosas contribuições, o estresse térmico humano não deve ser apenas avaliado por valores de temperatura e/ou umidade do ar, uma vez que a sensação térmica humana também é influenciada por outras variáveis meteorológicas (como a temperatura radiante média e a velocidade dos ventos), aspectos urbanos e parâmetros fisiológicos (KATZSCHNER, 2006; MATAZARASKIS et al., 2007).

No âmbito da biometeorologia humana, a sensação térmica de habitantes de uma região é avaliada por meio de índices de conforto térmico, que são formulados segundo o balanço de calor humano ou os modelos adaptativos (LAI et al., 2020). Dentre os índices mais utilizados no mundo, destaca-se o **Temperatura Equivalente Fisiológica** (*Physiological Equivalent Temperature*, PET em inglês), que foi idealizado no balanço de calor humano (POTCHER et al, 2018). Este índice é recomendado pela norma alemã de elaboração de mapas climáticos urbanos (VDI 3787, 2015), que são empregados na formulação de diretrizes urbanísticas para planejamento urbanos sensíveis ao clima (SOUZA, KATZSCHNER, 2018).

Uma forma de avaliar a variabilidade espacial do índice PET em áreas urbanas é por meio de modelagem numérica (MATZARAKIS et al., 1999; LINDBERG et al., 2019). Contudo, em escala de cidade, alguns desafios como escassa rede de estações meteorológicas e elevado custo computacional podem inviabilizar o mapeamento do PET nesta escala. Assim, esta pesquisa se propõe a avaliar o PET da cidade de João Pessoa, universo de análise desta pesquisa, por meio da abordagem multiescalar (DU et al., 2022), em que se utilizam modelos numéricos de previsão de tempo e de análise microclimáticas acoplados on-line ou off-line, para analisar como as condições atmosféricas de uma OC e a resposta térmica da superfície urbana atuam no desconforto térmico de uma população (DING et al., 2024). O modelo atmosférico de mesoescala WRF (SKAMAROCK et al., 2021) e o preditor ambiental UMEP (LINDBERG et al., 2017) são dois modelos amplamente aplicados em estudos

ambientais urbanos. Até a finalização desta pesquisa, esses modelos não haviam sido empregados em conjunto para analisar o estresse térmico em episódios de Ondas de Calor em cidades brasileiras.

Diante deste contexto, algumas **questões norteadoras** são apresentadas por esta tese:

1. Ocorreram Ondas de Calor em João Pessoa na última década que podem ser caracterizadas pelas variáveis temperatura máxima e mínima do ar?
2. Em dia de OC, onde localizam-se as áreas com o mais alto grau de estresse térmico positivo do índice PET (°C)?
3. Apenas a temperatura do ar é um indicador suficiente para identificar regiões que promovem elevado estresse térmico positivo na população local durante uma OC?

Para responder estas questões, esta pesquisa investigou diferentes definições e métricas adotadas no estudo e caracterização de OC, para selecionar um evento extremo em que se pudesse avaliar de forma espacial e em microescala o estresse térmico da população de João Pessoa. Além disso, os fluxos de energia do SEB foram abordados para uma melhor compreensão dos feedbacks térmicos da superfície urbana durante Ondas de Calor e para fundamentar uma adequada representação da área de estudo, de acordo com os objetivos da tese. Por fim, a pesquisa se dedicou à compreensão do índice PET (°C), quanto à sua definição, os parâmetros de influência e os métodos de avaliação.

Com base no referencial teórico e bibliográfico pesquisado, pretende-se responder às questões norteadoras por meio das seguintes **hipóteses**:

- A cidade de João Pessoa apresentou episódios de Onda de Calor no período de 2010 a 2013, que podem ser caracterizadas por valores extremos de temperatura máxima e mínima do ar;
- Em dia de OC, as áreas urbanas com o mais alto grau de desconforto térmico, segundo o índice PET (°C), podem ser encontradas ao longo de todo o território da cidade;
- Durante OC, as diferentes configurações da superfície urbana criam regiões únicas que promovem elevado estresse térmico positivo, independentemente de valores extremos de temperatura do ar.

Os resultados desta pesquisa podem fornecer informações relevantes para a compreensão do estresse térmico humano em cidades costeiras tropicais, em especial as de baixa latitude, durante eventos de calor extremo. Adicionalmente, a identificação de regiões com elevado desconforto térmico, assim como a quantificação de população exposta ao calor extremo, permitem a formulação de diretrizes de mitigação e adaptação às Ondas de Calor na cidade de João Pessoa, que podem ser replicadas a cidades com características climáticas e socioeconômicas semelhantes.

## **OBJETIVOS**

### **Geral**

Dado o exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a variabilidade do estresse térmico humano em um momento de Onda de Calor na cidade de João Pessoa, por meio do mapeamento em alta resolução espacial do índice de conforto térmico PET (°C), elaborado a partir de uma metodologia de análise multiescalar.

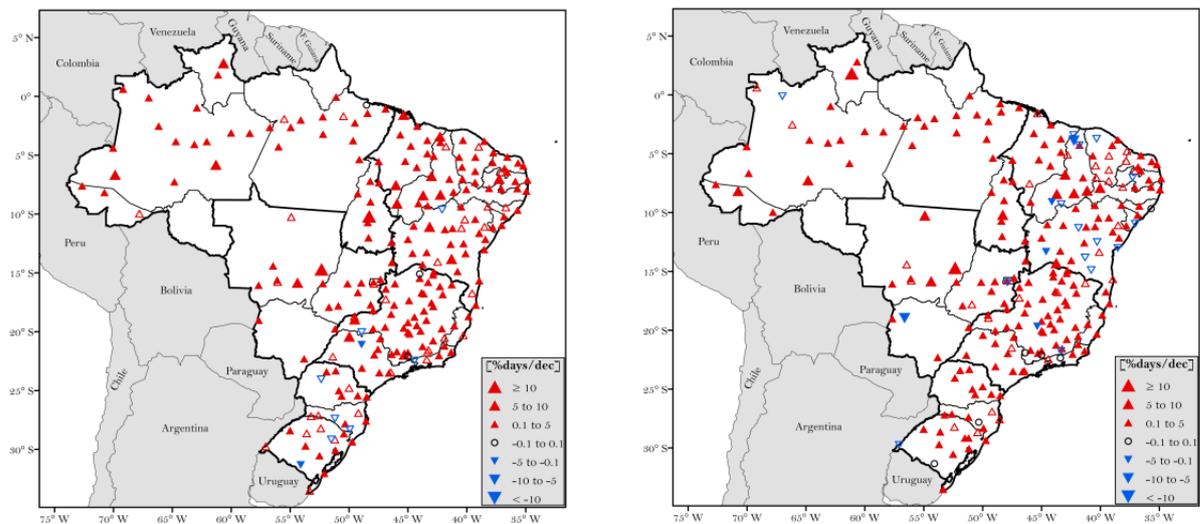
### **Específicos**

- Caracterizar os episódios de Ondas de Calor que ocorreram na cidade de João Pessoa durante o período de 2010 a 2023, por meio da análise de séries históricas de temperatura máxima e mínima do ar;
- Analisar o impacto de episódios de Ondas de Calor nos valores médios diários de temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento;
- Simular a distribuição espacial da temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento de um momento de Onda de Calor na cidade de João Pessoa, por meio do modelo WRF;
- Estimar os valores do índice PET (°C) sobre a área urbana da cidade de João Pessoa, com a aplicação do modelo numérico UMEP, para análises estatísticas e exploratória espaciais;
- Identificar áreas urbanas da cidade com elevado grau de estresse térmico positivo, para quantificar a população exposta ao calor extremo decorrente de uma Onda de Calor.

## JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O aumento da frequência e intensidade de Ondas de Calor tem sido observado em diversas pesquisas ao redor do mundo (MARX et al., 2021). Este cenário climático é confirmado na América do Sul, por meio de estudos que empregam tanto dados de campo quanto simulados em modelos numéricos globais e regionais (CECCHERINI et al., 2016; FERON et al., 2019). No Brasil, praticamente todas as regiões do país apresentam um aquecimento consistente e generalizado desde a década de 1960 (Figura 1), o que beneficia a ocorrência crescente de eventos extremos de calor (GEIRINHAS et al., 2018; BITENCOURT et al., 2020; REGOTO et al., 2021). Especificamente no Nordeste brasileiro, a alta vulnerabilidade social associada a uma mudança para um clima mais seco favorece a exposição da população local ao calor extremo (REGOTO et al., 2021; SILVA et al., 2022).

Figura 1 - Tendências anuais observadas dos extremos de temperatura no Brasil (1961-2017). Dias quentes (esquerda) e noites quentes (direita).



Fonte: Regoto et al., 2021.

Pode-se concluir que estes estudos trouxeram conhecimentos relevantes sobre a climatologia e impactos de OC em diferentes escalas regionais. Contudo, no âmbito da avaliação da sensação térmica humana em momentos de calor extremo em escala de cidade, as pesquisas ainda são incipientes no Brasil. Isto se deve à complexidade do tema, visto que é necessário um olhar interdisciplinar e uma avaliação holística do conforto térmico num cenário de calor extremo, além de um conjunto robusto de informações meteorológicas e espaciais em escala microclimática (LAI et al., 2020).

Mais de 60% da população mundial vive em áreas costeiras (até 100 km da costa), em cidades com alta densidade populacional e com elevada umidade relativa, o que torna essas populações mais vulneráveis aos efeitos nocivos das OC (WEI et al, 2024). João Pessoa é uma cidade costeira situada no Nordeste Brasileiro e caracteriza-se por temperaturas elevadas, alta umidade relativa e um regime de ventos persistentes (DINIZ et al., 2016; ANJOS et al., 2020). Destaca-se como um dos principais destinos turísticos do país, o que levou ao crescimento populacional nos últimos 10 anos (IBGE, 2022). Adicionalmente, a população idosa tem aumentado devido tanto ao envelhecimento dos residentes quanto à vinda de pessoas de outros municípios, que buscam a cidade como refúgio para a aposentadoria. Esse cenário torna João Pessoa uma cidade ainda mais suscetível aos efeitos nocivos das OC, exigindo estudos que avaliem o estresse térmico em condições de calor extremo.

Apesar das qualidades naturais de João Pessoa, pesquisas locais mostram que aspectos urbanos, como o ordenamento da cidade, a geometria e dimensão das edificações, a alta impermeabilidade do solo e a redução da cobertura vegetal, têm favorecido a formação de Ilha de Calor Urbano e o desconforto térmico da população em diversas áreas (SILVA, 1999; SANTOS et al., 2011; SOUZA, KATZSHCNER, 2018; SILVA et al., 2022). Além disso, não há estudos locais que avaliem o impacto de OC na variabilidade de parâmetros meteorológicos e na sensação térmica da população, o que fundamentaria a formulação de recomendações urbanísticas para tornar a cidade resiliente a esses eventos extremos. Neste contexto, esta pesquisa pretende lançar luz sobre estes temas.

A identificação de áreas com elevada carga térmica é uma informação crucial para o planejamento urbano, a arquitetura de edificações e o sistema de saúde público. No âmbito do planejamento urbano, esta informação pode ser usada por gestores públicos para a formulação de diretrizes e índices urbanísticos adequados à redução da carga térmica em períodos de calor (HEBBERT, 2014). Quanto à arquitetura, o edifício pode melhor adaptar-se aos efeitos de elevada carga térmica do entorno por meio de estratégias bioclimáticas, que visam reduzir o ganho de calor (OLGYAY, 2006). E no que diz respeito ao sistema de saúde público, a delimitação de áreas que favorecem o aumento do calor extremo pode contribuir no redirecionamento de esforços e na implantação de estabelecimentos de saúde que levem a redução dos impactos nocivos das OC (MASON et al., 2022). Neste contexto, esta pesquisa pode

contribuir na tomada de decisão dos gestores e produtores do espaço público da cidade de João Pessoa para a melhoria da qualidade ambiental urbana.

Por fim, a presente pesquisa pode contribuir com estudos vindouros que se utilizem do acoplamento dos modelos WRF e UMEP, ao reproduzir o método aqui proposto. Devido à escassez de estações de coleta de dados meteorológicos de grande parte das cidades brasileiras, como ocorre em João Pessoa, o desenvolvimento de estudos que busquem a avaliação da sensação térmica humana ao longo de todo um município pode ser inviabilizado. Desse modo, modelos numéricos de mesoescala e microescala podem ser utilizados para estimar a distribuição espacial de parâmetros meteorológicos e climáticos, de acordo com a resolução espacial e temporal adequada aos objetivos de uma pesquisa.

## **ESTRUTURA DA TESE**

Os elementos textuais que estruturam esta tese são: esta **Introdução**; o **Referencial Teórico**, em que foram descritas as fundamentações teóricas sobre as Ondas de Calor, o Balanço de Energia de Superfície Urbano e o índice de conforto térmico PET (°C); o **Referencial Bibliográfico**, no qual foram apresentados estudos que utilizaram o modelo numérico WRF na análise de Ondas de Calor e que realizaram o mapeamento do índice PET em escala de cidade; a **Descrição dos Modelos Numéricos**, abrangendo o WRF e o UMEP; o **Universo de Análise**, representado pela cidade de João Pessoa; a **Metodologia** da pesquisa, em termos de caracterização do método e descrição das etapas; os **Resultados e Considerações** da tese, fundamentados a partir dos objetivos propostos; e por fim, a **Conclusão**, em que se apresentam as respostas às questões norteadoras, a viabilidade da hipótese, as limitações da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. ONDAS DE CALOR

#### 2.1.1. Definições e métricas de Ondas de Calor

Conhecidas por serem fenômenos meteorológicos esporádicos, caracterizadas por promover períodos de elevado estresse térmico em sociedades urbanas, as Ondas de Calor (*Heatwaves* ou *Heat Waves*, em inglês) receberam diversas definições ao longo dos anos (CAMPBELL et al., 2018; YADAV et al., 2023), o que influencia significativamente o resultado das pesquisas e as avaliações do impacto das alterações climáticas sobre esses eventos (AWASTHI et al., 2022).

A Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization*, WMO em inglês) define uma OC como: “o aquecimento significativo do ar, ou invasão de ar muito quente, em uma grande área, que geralmente dura de alguns dias a algumas semanas” (WMO-N° 1310, 2023). De forma similar, o glossário de termos do sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC em inglês) descreve o evento como: “Um período de clima anormalmente quente, muitas vezes definido com referência a um limite relativo de temperatura, com duração de dois dias a meses” (CALVIN, 2023).

No Brasil, algumas instituições seguem as definições propostas pelas WMO e IPCC e enfatizam o excesso e período de calor. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) conceitua uma OC como: “Período de tempo desconfortável e excessivamente quente. Pode durar vários dias ou várias semanas” (INMET, 2023). Apesar dessa definição ampla, o INMET emite alertas de nível amarelo à população quando a previsão meteorológica indica que as temperaturas máximas do ar devem ficar 5,00°C acima da média mensal pelo período de dois ou mais dias consecutivos.

Uma definição objetiva quanto ao período e ao valor da temperatura do ar é apresentada pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, com base em sua Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE). O órgão descreve uma OC como:

É um período prolongado excessivamente quente e desconfortável, onde as temperaturas ficam acima de um valor normal esperado para aquela região em determinado período do ano. Geralmente é adotado um período mínimo de três dias com temperaturas 5°C acima dos valores máximos médios” (COBRADE, 2024).

Atualmente, diversas pesquisas têm se utilizado de índices para definir uma OC, dentro de uma abordagem meteorológica (WMO-N° 1310, 2023). Muitos destes índices foram fundamentados em limiares definidos a partir de valores da temperatura do ar, para avaliar extremos que normalmente ocorrem algumas vezes por ano, ao invés de eventos extremos que ocorrem uma vez a cada década.

Conforme Yang et al. (2020), os limiares empregados nas definições de OC são geralmente de três tipos, a saber: o absoluto, o relativo e o combinado. O limiar absoluto emprega um valor de temperatura do ar fixo que representa o limite inferior para uma condição de OC (YOU et al., 2017; FISCHER et al., 2021). O limiar relativo é baseado em um percentil fixo de distribuição de temperatura do ar considerando a climatologia local (RUSSO et al., 2014; FERON et al., 2019; MARENGO et al., 2022). E por último, o limiar combinado baseia-se no uso de mais de uma variável meteorológica, por vezes incluindo índices de estresse térmico (PERKINS, ALEXANDER, 2013; YANG et al., 2020).

Como exemplo de uma definição que emprega um limiar fixo, pode ser citado a do *Bureau of Meteorology* (BoM), que é a agência meteorológica da Austrália. Esta instituição emprega diferentes definições que dependem da região do país (NAIRN, FAWCETT, 2013). Para a cidade de Adelaide, uma OC é definida como 5 dias com temperatura máxima do ar (Tmax) acima de 35 °C ou 3 dias acima de 40 °C, e para a cidade de Perth, 3 dias com Tmax acima de 35 °C. Embora esse tipo de definição facilite a identificação de OC, essa abordagem é criticada por alguns autores por não levar em consideração a variabilidade climática natural das regiões (DE BOECK et al., 2010).

O limiar relativo é baseado no emprego da medida estatística percentil a partir de dados da climatologia local da temperatura do ar. Esta abordagem é largamente utilizada por pesquisadores do clima e pode receber diferentes percentis, a depender do foco da pesquisa. Em uma análise global, Perkins-Kirkpatrick e Lewis (2020) identificaram eventos extremos de calor por meio do índice CTX90 (WMO, 2023), que define uma OC quando pelo menos 3 dias consecutivos estão acima do limite extremo de Tmax, baseado no 90° percentil durante uma estação quente de 5 meses.

Com o objetivo de focar em eventos com intensidades ainda mais extremas na Europa e região do Mediterrâneo, Stefanon et al. (2012) classificaram as OC a partir do limite 95° percentil de Tmax, além de impor restrições adicionais nas extensões espacial

(fração da superfície onde a temperatura excedia o 95º percentil) e temporal (quatro dias consecutivos de evento) para evitar eventos intermitentes e locais indesejados. Ademais, os autores consideraram apenas a estação verão (junho a agosto). Para a América do Sul, Feron et al. (2019) identificaram dias extremamente quentes aqueles que ultrapassaram o 95º percentil da distribuição da anomalia de Tmax em um intervalo de tempo de pelo menos 3 dias consecutivos.

Por último, o limiar combinado foi empregado por Yang et al. (2020) para analisar as projeções de OC na China. A definição proposta por estes autores foi construída a partir de um limiar relativo de 95º percentil da Tmax diária de referência do período e de um limiar fixo de 30°C, para um evento de pelo menos 3 dias consecutivos. As pesquisas de OC que se utilizam deste tipo de limiar tendem a ser mais seletivas na identificação dos eventos extremos, o que resulta em um número menor de eventos identificados em uma série temporal. Em estudo de caracterização de Ondas de Calor na cidade de João Pessoa, Souza et al. (2024) identificaram que a mudança dos tipos de limiares nas definições de Ondas de Calor pode levar a mudanças significativas nos resultados da pesquisa, entre eles a duração dos eventos em uma mesma série histórica (Tabela 1).

Tabela 1 - Percentual da duração (dias) de OC segundo diferente limiares.

Tipo de Limiar	Tipo de OC	Duração (Dias)			
		3	4	5	>= 6
Absoluto	OC (Tmax)	30,91	25,45	14,55	29,09
	OC (Tmin)	46,00	28,00	14,00	12,00
Relativo	OC (Tmax)	40,82	26,53	6,12	26,53
	OC (Tmin)	38,46	28,21	15,38	17,95
Combinado	OC (Tmax/Tmin)	50,00	38,89	5,56	5,56

Fonte: Adaptado de Souza et al., 2024 (artigo em revisão de periódico).

Cabe ressaltar que estudos que se utilizam de modelo climáticos globais e regionais para caracterizar OC podem obter resultados distintos a partir do tipo de limiar escolhido na definição desses eventos extremos. Yang et al. (2020) compararam definições de OC pautadas nos três tipos de limiares e identificaram que o limiar combinado foi o que melhor performou quando se comparou os dados obtidos por medições em campo e por modelos numéricos atmosféricos globais.

Como observado por De Boeck et al. (2010), as definições fundamentadas na abordagem meteorológica/climática caracterizam as OC segundo aspectos temporais (estudo diagnóstico atual) e climáticas (tendências). Porém, desde o lançamento dos relatórios do IPCC, na década de 1990, um número crescente de pesquisas tem adotado definições de OC com uma abordagem ecológica, ao também avaliar os impactos destes eventos extremos em populações e na saúde pública.

Nos Estados Unidos, Robinson (2001) trouxe importante contribuição para o conceito desses eventos extremos de calor, ao destacar a importância da sensação térmica humana na avaliação de seus impactos.

[...] apesar de uma onda de calor ser um evento meteorológico, não pode ser avaliada sem referência aos impactos humanos. Uma combinação de elementos meteorológicos relacionados à sensação humana do calor deve ser usada. Limiares adequados devem ser estabelecidos para essa combinação, considerando-se tanto os valores de alta do dia e de baixa noturna e relacionando-os com a variabilidade climática comum para a área. O efeito de duração também deve ser incluído. (ROBINSON, 2001, p.763).

Assim, Robinson (2001) apresenta uma abordagem e limiares para definição de OC a partir de uma base de investigação que foca no conforto térmico e na saúde humana. Ademais, o autor chama a atenção para que os valores de temperatura do ar noturno devam ser considerados nos limiares utilizados em definições de OC.

Desde então, um número significativo de pesquisas passou a associar a ocorrência de OC a aspectos do conforto humano e saúde pública. Laschewski e Jendritzky (2002) avaliaram a mortalidade associada aos períodos de OC, na Alemanha, definindo uma OC a partir de um índice de avaliação fisiológica do calor ambiente (índice de conforto térmico) chamada temperatura percebida (TP), que considera os efeitos da temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento e radiação nas trocas térmicas do corpo humano. Os autores constataram que há um aumento de +3,9% nas taxas de mortalidade durante este evento, duas vezes maior do que durante os períodos de frio.

Ho et al. (2017) avaliaram os efeitos prolongados do calor na mortalidade na cidade de Hong Kong e descobriram que um número de noites quentes consecutivas contribuiu mais para um maior risco de mortalidade do que um número de dias quentes consecutivos. Os pesquisadores empregaram dois limites de temperatura neste

estudo chamados *Very Hot Days* (pelo menos 1 h de temperatura diurna  $\geq 33$  °C) e *Hot Nights* (todas as horas de temperatura noturna  $\geq 28$  °C).

Na Espanha, Royé et al. (2020) avaliaram os efeitos da intensidade de OC na mortalidade em quatro cidades espanholas. Os autores empregaram o índice Fator de Excesso de Calor (*Excess Heat Factor*, EHF em inglês), que é um índice composto pela comparação da temperatura média diária de três dias em relação ao 95º percentil das temperaturas médias de longo prazo e nas temperaturas recentes (30 dias anteriores), para um determinado local (NAIRN, FAWCETT, 2013). Foi constatado no estudo que as curvas de exposição-resposta específicas da cidade mostraram uma relação não linear em forma de J entre mortalidade e o índice EHF, além de demonstrarem que diferentes dias de OC do mesmo evento não apresentaram o mesmo grau de severidade/intensidade.

Na Austrália, o impacto de OC na mortalidade foi avaliado por Tong et al. (2014). Os autores definiram este evento como a temperatura média do ar acima de três limiares de calor (90º, 95º e 99º percentis) por 2 ou mais dias consecutivos na temporada de verão. Os resultados demonstraram que houve um aumento expressivo na mortalidade durante as OC, mas os seus impactos variaram conforme a duração do evento, localidade e aspectos demográficos (idade e sexo).

Apesar de haver um consenso quanto ao aumento do número de eventos extremos de calor nos últimos anos no Brasil e regiões (MOURA, 2013; SILVEIRA, SANT'ANNA NETO, 2015; BITENCOURT et al., 2016; ARAÚJO, 2017; REIS et al., 2019; MANDÚ et al., 2020; DINIZ, 2022; SILVA et al., 2022), o decorrente impacto no aumento da mortalidade e/ou morbidade no país apresenta resultados distintos.

Moura (2013) avaliou a ocorrência de Ondas de Calor e Frio e seus impactos na morbidade por doenças cardiovasculares da população da cidade de Fortaleza, Ceará, no período de 1974 – 2009. O autor definiu estes eventos a partir de percentis P5 e P95 dos valores diários das temperaturas mínimas e máximas do ar, respectivamente, com duração de 3, 4 e  $\geq 5$  dias. Por não encontrar correlação forte e estatisticamente significativa destes eventos com o número de morbidade, o autor não reconheceu estes eventos como OC, denominando-as como anomalias de temperaturas extremas.

Silveira e Sant'anna Neto (2015) avaliaram treze tipos de repercussões relacionados aos episódios de calor e frio em cidades do Rio Grande do Sul. No que diz respeito ao número de óbitos, os autores não identificaram números significativos relacionados aos eventos de calor. Na realidade, as Ondas de Frio tiveram um impacto real na mortalidade local.

Ao definir OC como um período de três dias consecutivos ou mais a partir dos 90º, 95º e 98º percentis de temperatura máxima do ar, Diniz (2022) também não encontrou correlações médias ou altas entre a mortalidade de idoso por doenças cardiovasculares ou respiratórias e ocorrência de OC nas capitais brasileiras. De fato, a autora informa que a maioria das capitais mostraram um aumento da mortalidade com a diminuição da *T<sub>max</sub>*.

Resultados diferentes foram registrados por Araújo (2017) que estimou os efeitos marginais da incidência de OC sobre o número de óbitos por 100.000 habitantes em todos os municípios brasileiros. Constatou-se que, em geral, os efeitos de OC são marcados por aumentos nas taxas de mortalidade por doenças infecciosas/ parasitárias e do aparelho circulatório, principalmente em idosos. Para definir OC, o autor usou o índice Fator de Excesso de Calor (EHF) e considerou o período de pelo menos 3 dias de temperaturas extremas.

Moraes et al. (2022) avaliaram os impactos das OC e Ondas de Frio sob diferentes definições na mortalidade de pessoas idosas ( $\geq 65$  anos) em São Paulo de entre os anos de 2006 e 2015. Os autores constaram um aumento nas mortes decorrente dos episódios de OC, principalmente quando foram definidas com os maiores limiares de temperatura (acima do 95º percentil) e com o maior número de dias.

Estes resultados distintos podem ser consequência das diferentes definições adotadas pelos autores para as Ondas de Calor. O tipo de limiar utilizado, as variáveis meteorológicas empregadas e o número mínimo de dias de uma OC influenciam os resultados das pesquisas, incluindo a caracterização dos eventos. Além disso, as características climáticas das regiões analisadas impactam a ocorrência e intensidade das OC, o que pode aumentar ou reduzir a sua influência na mortalidade e morbidade de uma determinada região (DINIZ, 2020).

Ainda em relação às definições de OC, destaca-se que os limiares ou índices adotados utilizam geralmente apenas a variável temperatura do ar. Mesmo estudos

que aplicam o índice EHF como indicador de estresse térmico são baseados exclusivamente nessa variável (WEI et al., 2024). Do ponto de vista do conforto térmico humano em ambientes externos, a temperatura do ar é apenas um dos parâmetros meteorológicos que determinam a sensação térmica e os diferentes graus de estresse térmico humano (MATZARAKIS et al., 2010; HIRASHIMA et al., 2016). Portanto, para uma melhor avaliação da exposição de uma população ao calor durante um episódio de OC, é essencial considerar outros parâmetros meteorológicos, urbanos, e até mesmo fisiológicos (GEORGIADIS, 2017). Na seção 2.3, este tema será abordado com maior profundidade.

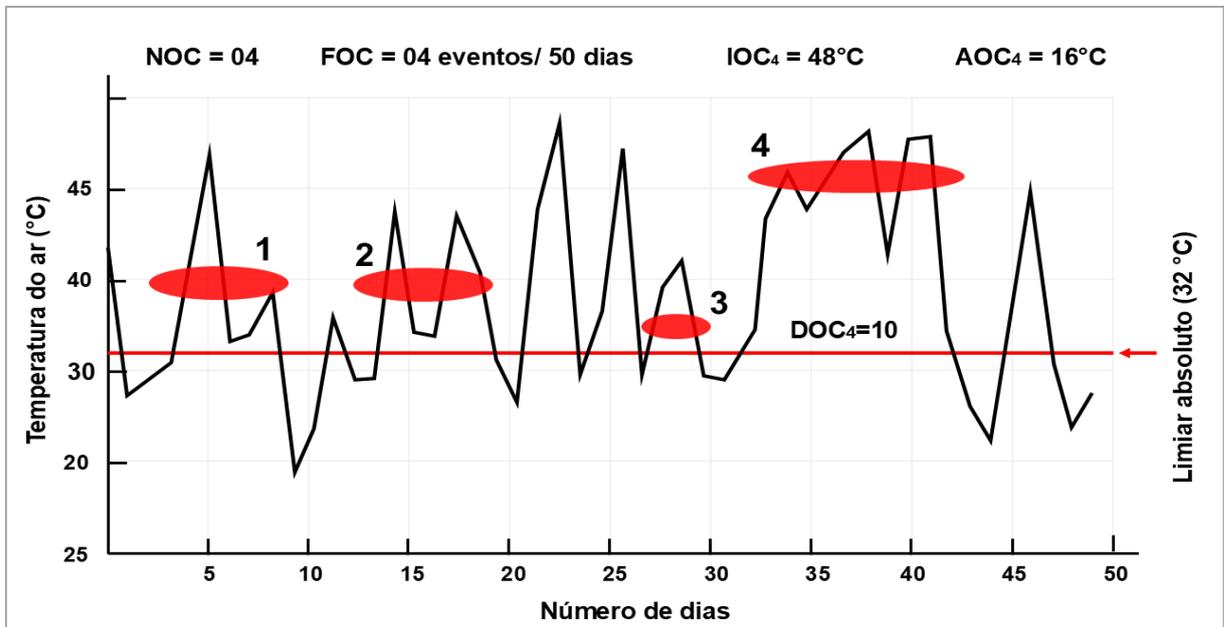
Uma vez definidas as OC, podem ser determinadas métricas para investigar o seu ritmo e dinâmica, com o objetivo de caracterizá-las a partir de uma determinada série temporal. Segundo Perkins (2015), as métricas mais utilizadas para avaliar as OC são, a saber: número de episódios (quantidade de eventos em uma série temporal), duração (número de dias por evento), frequência (número total de eventos por período), intensidade (pico do valor de temperatura diária), a magnitude do período (média dos valores de temperatura dos eventos) e amplitude (diferença diária média entre valor da intensidade da OC e a média de temperatura).

Na Figura 2 são demonstradas algumas métricas adaptadas de Perkins (2015) e a forma de determiná-las em uma série temporal. Neste exemplo, o limiar absoluto é representado pela linha vermelha no gráfico (32 °C). Percebe-se que vários dias obtiveram valores acima deste limiar contudo, uma OC só ocorre quando pelo menos 3 dias seguidos ou mais estão acima deste limite. Como pode ser visto na Figura citada, quatro eventos ocorreram ao longo da série, marcados pela elipse vermelha. Obtém-se, portanto, a primeira métrica que é o **número** de Ondas de Calor (NOC). A seguir, o evento mais longo durou 10 dias, o que representa a métrica **duração** do evento (DOC). Com a soma de todos os eventos, tem-se a **frequência** para o período (FOC). A partir dos valores máximos de temperatura do ar das OC, determina-se a **intensidade** da OC (IOC), que é o maior valor de temperatura do ar registrado do evento, e a **amplitude** da OC (AOC), que se obtém pela diferença entre a temperatura do dia mais quente e o limiar absoluto.

Alguns autores ainda avaliam a variabilidade diária dos valores de temperatura do ar até o dia de intensidade máxima de uma Onda de Calor. Essas métricas são chamadas de **taxa de ascensão** (graus/dia) e de **taxa de declínio** (graus/dia)

(HOBDAY et al., 2016). Estas métricas são importantes para compreender se o aumento ou a redução da temperatura do ar em dias de OC apresenta um comportamento gradativo ou abrupto, em termos gerais.

Figura 2 -Esquema de métricas de OCs adaptado de Perkins, 2015.



\*NOC = Número de Ondas de Calor; FOC = Frequência das Ondas de Calor; IOC = Intensidade da Onda de Calor; AOC = Amplitude da Onda de Calor; DOC = Dias com Ondas de Calor.

Fonte: Adaptado de Perkins, 2015.

### 2.1.2. Impactos das Ondas de Calor

Embora os efeitos nocivos das OC em populações urbanas não sejam tão evidentes visualmente quanto os de outros desastres naturais (por exemplo, um terremoto ou um furacão), as OC causam impactos de forma direta e/ou indireta no corpo humano (RIBEIRO, 2016; PAHO, 2021).

#### a. Impacto direto

De forma direta, os dias extremamente quentes são conhecidos por terem impactos nocivos na fisiologia do corpo humano (CAMARGO e FURLAN, 2011; BASARIN et al, 2020). Segundo Marto (2005), doenças relacionadas com o calor (DRC) incluem exantemas, câibras, síncope, exaustão pelo calor e golpe de calor. Esta última é uma emergência médica relacionada à temperatura causada pela incapacidade do corpo

em manter a homeostase da temperatura, podendo evoluir para um quadro de disfunção multiorgânica (MCGREGOR, 2015).

Inúmeros estudos comprovaram que a exposição excessiva do corpo humano ao calor pode resultar no aumento da mortalidade e morbidade (JIMÉNEZ et al., 2005; MCMICHAEL et al., 2008; HAJAT, KOSATKY, 2010; XU et al., 2016; WANG et al., 2019). No entanto, conforme o banco de dados internacional de desastres (*Emergency Event Database*, EM-DAT em inglês), a mortalidade e morbidade relacionadas às OC mostram-se mais pronunciadas em regiões de latitudes médias e com climas de elevada amplitude térmica (DONATTI et al., 2024).

Como visto na seção anterior, ao menos para o Brasil, em meio as complexidades e particularidades climáticas de cada lugar, ainda não é certo afirmar que as OC provocam um aumento na mortalidade e/ou morbidade da população em todo o país. Porém, o episódio de 8 dias que afetou a Região Metropolitana do Rio de Janeiro em fevereiro de 2010, com temperaturas máximas próximas a 39 °C, representou um excesso de 737 óbitos associados às condições de calor extremo (GEIRINHAS et al., 2019).

Diversos estudos de vulnerabilidade ao calor extremo demonstraram que determinados grupos populacionais podem ser mais suscetíveis às OC (ADNAN et al., 2022). Os principais grupos atingidos são idosos acima de 65 (HAJAT, KOSATKY, 2010), crianças abaixo dos 5 anos de idade (WANG et al., 2012), pessoas confinadas em casa, à cama ou incapazes de cuidar de si mesmo (LINDLEY et al., 2011); os socialmente isolados (REID et al., 2009; LOUGHNAN et al., 2012) e os que sofrem de doença psiquiátrica ou cardiorrespiratória (PAIXÃO, NOGUEIRA, 2003).

Cabe salientar que os impactos diretos de OC no corpo humano podem não ser sentidos imediatamente. Segundo PANTAVOU et al. (2008), os óbitos atribuíveis ao calor atingem um máximo de um a dois dias após o início das temperaturas elevadas e aumentam de forma exponencial ao longo da OC. Interessante notar que, nas semanas subsequentes, há habitualmente uma diminuição dos óbitos, devido a uma antecipação da morte dos indivíduos com saúde mais frágil. É por isso que as OC receberam o nome de “assassinas silenciosas”, uma vez que não têm efeito instantâneo na saúde humana (LOUGHNAN et al., 2012).

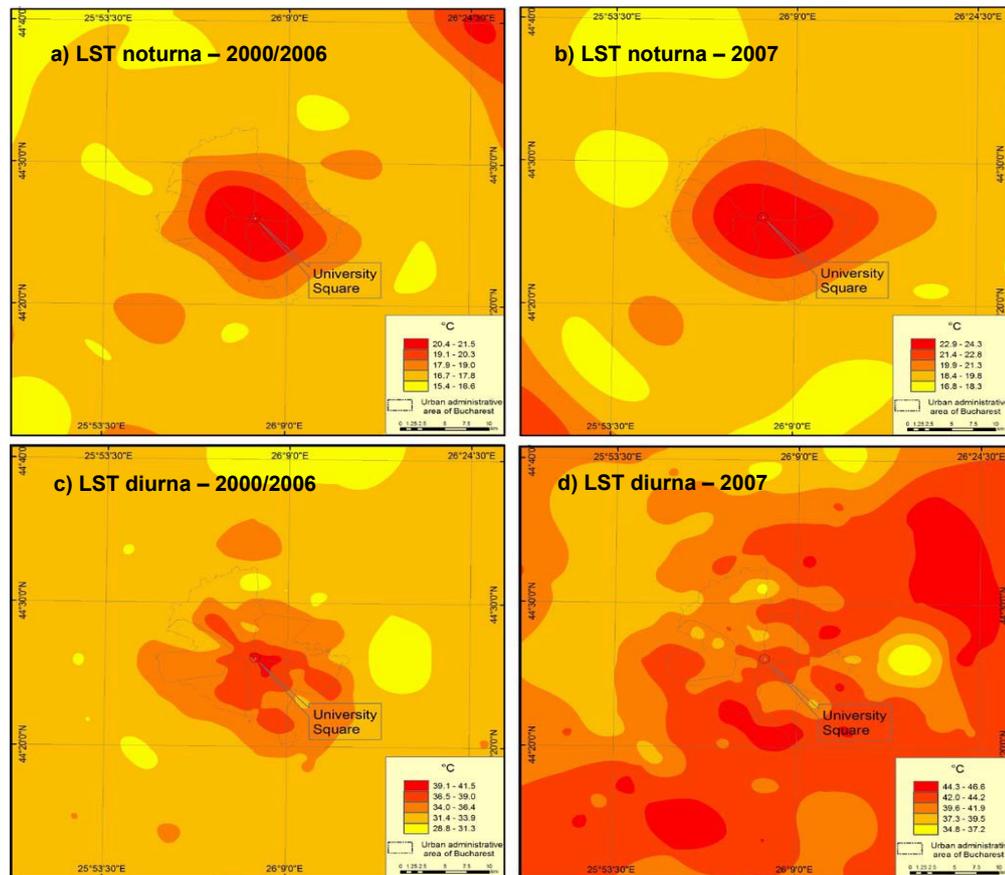
## b. Impactos indiretos

Os impactos indiretos de OC em populações urbanas estão relacionados, geralmente, às alterações na capacidade de suporte dos ecossistemas urbanos e nas características climáticas das cidades. Estudos demonstram que esses eventos estão associados ao aumento do consumo de energia elétrica (RIBEIRO, 2016; HANSEN et al., 2022) e de água (GULERIA & GUPTA, 2018), à deterioração de estruturas edificadas (ARKELL, DARCH, 2006; MCEVOY et al., 2012), à alteração no ciclo de vida de insetos vetores (favorecendo a dispersão de agentes infecciosos), à sobrecarga do sistema de saúde (WANG et al., 2012) e ao surgimento de incêndios florestais (LIBONATI et al., 2022).

No âmbito do clima urbano, pesquisas têm demonstrado que a ação em escala mesoclimática das OC pode sinergicamente interagir com parâmetros climáticos relacionados ao estresse térmico humano (RAMAMURTHY, BOU-ZEID, 2017; CHAKRABORTY, LEE, 2019; FOUNDA, SANTAMOURIS, 2017; PYRGOU, HADJINICOLAOU, SANTAMOURIS, 2020). Destes destacam-se a Temperatura de Superfície Terrestre (*Land Surface Temperature*, LST em inglês) e a Ilha de Calor Urbana (*Urban Heat Island*, UHI em inglês), definido por por OKE et al. (2017) como a representação da diferença positiva entre a temperatura de cidades (ou região urbanizada) e as suas redondezas (áreas rurais ou naturais).

Como exemplo, as características da LST de Bucareste, Romênia, foram investigadas por Cheval et al. (2010) durante um evento de OC em julho de 2007, utilizando imagens termais de satélites. Como pode ser visto na Figura 3, os resultados demonstraram que no período noturno (Figura 3b), a LST sob a ação da OC foi ampliada, espacialmente, e intensificada, em mais de 2°C, em comparação com anos anteriores (Figura 3a). No período diurno, a OC aparentemente eliminou a UHI de superfície, por reduzir drasticamente as diferenças diurnas entre as temperaturas urbanas e rurais (Figura 3d), em outras palavras, tanto áreas urbanas quanto rurais apresentaram temperaturas mais elevadas, um padrão diferente ao observado em períodos sem OC (Figura 3c).

Figura 3 - Comparação da UHI de superfície diurna e noturna em Bucareste, Romênia.



Fonte: Adaptado de Cheval et al., 2010.

Além dos efeitos sinérgicos com a LST e a UHI, as OC também impactam o balanço de energia de superfície urbano (OKE et al., 2017), que é o resultado das trocas térmicas radiativas e não radiativas da superfície com a atmosfera urbana e tem impacto direto no conforto térmico humano. Efeitos de OC no balanço de energia de superfície urbano serão melhor descritos na seção 2.2.

### 2.1.3. Processos físicos envolvidos na formação de Ondas de Calor

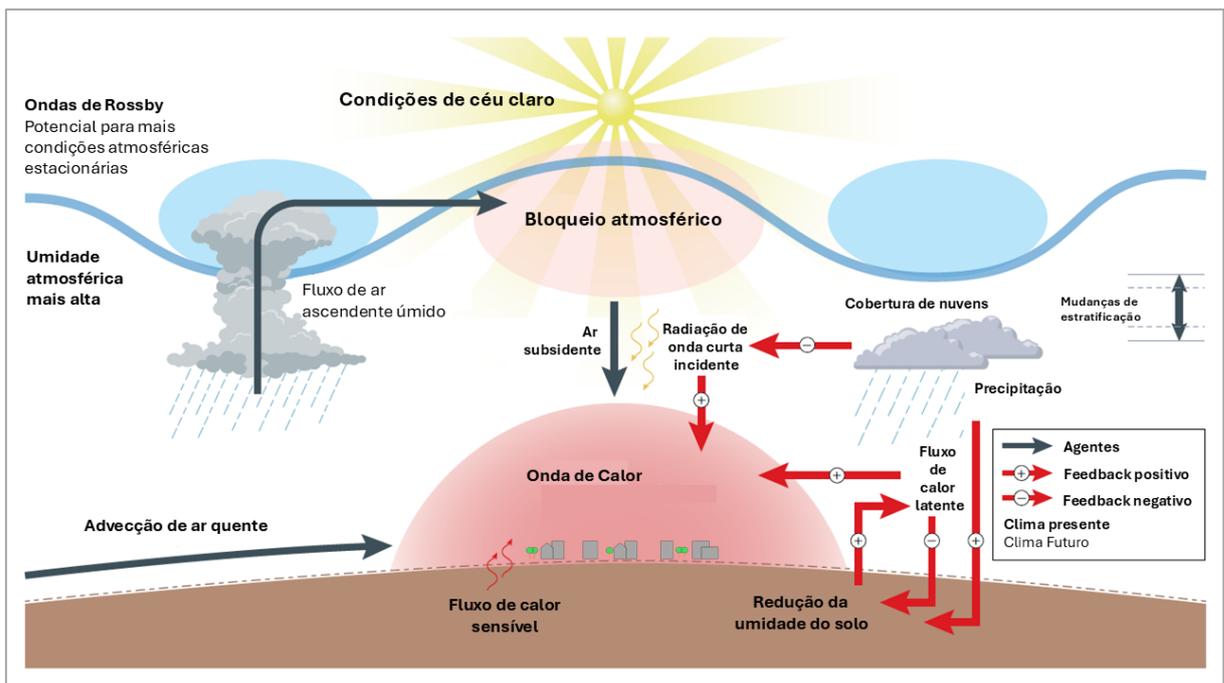
Ondas de calor são fenômenos de larga escala impulsionados por processos atmosféricos que dependem da região onde estes eventos ocorrem (DOMEISEN et al., 2022). Além disso, o seu comportamento pode ser ligeiramente modificado por fatores locais, como por exemplo, a proximidade e orientação da costa marítima, altitude, orografia e aspectos da superfície (PERKINS-KIRKPATRICK et al., 2016).

A WMO revela que o fenômeno, normalmente, acontece sob condições sinóticas de alta pressão atmosférica, isto é, sob centros de ação positivos (MCGREGOR, 2015). Segundo Mendonça (2007), em superfícies sob uma alta pressão atmosférica, há uma

tendência de movimento vertical do ar que se verifica de cima para baixo (movimento subsidente), o que dificulta a formação de nuvens. Com um céu limpo e claro, ocorre uma intensificação da entrada de radiação solar direta na superfície urbana, o que promove a elevação dos fluxos de calor sensível e, conseqüentemente, da temperatura do ar próxima à superfície.

Na Figura 4 é apresentado uma representação esquemática dos processos físicos em diferentes escalas que impulsionam as OC em latitudes médias, segundo Domeisen et al. (2022). Além das condições citadas anteriormente, pode ocorrer advecção horizontal do ar de regiões mais quentes, aquecimento adiabático por subsidência e aquecimento diabático devido à radiação e fluxos turbulentos de calor sensível à superfície. Ressalta-se que nem todos estes processos precisam, necessariamente, ocorrer para a formação de OC, que varia conforme a hora do dia/noite e entre regiões.

Figura 4 - Processos físicos que contribuem com a formação de OC em latitudes médias.



Fonte: Adaptado de Domeisen et al., 2023.

Na Austrália, Perkins-Kirkpatrick et al. (2016) avaliaram os processos físicos que contribuem para a formação de OC em diferentes partes do país. Os resultados mostraram que as OC são influenciadas por diferentes fenômenos climáticos de grande escala (El Niño-Oscilação Sul, La Niña, Dipolo do Oceano Índico e Oscilação Antártica), a depender da região e da época do ano. Soma-se a estes fenômenos a

atuação de um anticiclone persistente, amplamente associado a ondas de Rossby, e a ação local da superfície, geralmente com uma elevada deficiência hídrica.

Na Europa, alguns autores associaram as OC a padrões específicos de circulação atmosférica relacionados com anomalias positivas semiestacionárias de altura geopotencial próxima aos 500 hPa, que produzem subsidência, céus limpos, ventos fracos, advecção de ar quente e condições prolongadas de calor à superfície (MEEHL, TEBALDI, 2004; STEFANON et al., 2012). Na América do Sul, Marengo et al. (2021) avaliaram os padrões de circulação em grande escala associados ao episódio de OC ocorrido em outubro de 2020, que afetou parte central da região. Esta OC formou-se a partir de um bloqueio atmosférico persistente, fruto de uma quase-estacionária onda de Rossby e a presença contínua de uma massa de ar quente por vários dias consecutivos, reforçada pela umidade do solo extremamente baixa.

No Brasil, Geirinhas et al. (2018) avaliaram a ocorrência de OC em algumas cidades brasileiras e identificaram a presença de anomalias de altura geopotencial concêntrica bem-marcada e positiva de 500 hPa seguidas por positivas de temperatura de 850 hPa. Os autores acreditam que estas anomalias estão associadas a sistemas anticiclônicos quase-estacionários promovidos por deslocamentos anômalos para oeste do Alto Sistema Subtropical do Atlântico Sul, que estão relacionados a um enfraquecimento de outros sistemas como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCIT também foi identificada por Moura (2013), como um fenômeno de larga escala presente na ocorrência de três episódios de anomalias extremas de temperatura na cidade de Fortaleza. Porém, o sistema atmosférico dominante foi a Massa Equatorial Atlântica Sul (MEAS).

Perkins (2015) considera que, embora os sistemas de alta pressão persistentes sejam uma condição sinótica necessária para a formação de uma OC, o acoplamento com a superfície da terra é indiscutivelmente o mais importante. Localmente, a superfície do solo fornece feedbacks importantes que podem exacerbar ou atenuar a intensidade dos eventos extremos de calor, conforme suas características (albedo, rugosidade da superfície e umidade do solo, por exemplo). Quando a superfície do solo tem muita umidade, o calor latente é o fluxo dominante, porém isso se inverte quando o solo está seco, promovendo o fluxo de calor sensível. Desse modo, há um efeito positivo de retorno entre o aquecimento atmosférico e o posterior déficit hídrico do solo.

Geirinhas et al. (2019) mostraram a relevância dos mecanismos de feedback solo-atmosfera no desenvolvimento da OC que atingiu a Região Metropolitana do Rio de Janeiro em fevereiro de 2010. Com a presença de uma circulação anticiclônica em baixos níveis, o transporte de umidade da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) para a região foi direcionado para a Bacia do Prata. Com a menor cobertura de nuvens e maior incidência de radiação, houve um ciclo de retroalimentação que agravou as condições de calor e seca, intensificando o acoplamento positivo entre temperatura do ar e umidade do solo. Adicionalmente, o efeito de ventos catabáticos quentes intensificou o aquecimento adiabático, superando o resfriamento horizontal decorrente de brisas marítimas características da região.

Uma vez que a superfície do solo desempenha um papel fundamental no impacto das OC sobre o conforto humano, torna-se essencial compreender quais os processos físicos na escala urbana que estão associados a elevação da temperatura do ar. Na próxima seção, o balanço de energia de superfície será discutido a partir de seus componentes e influência da ação das OC.

## 2.2. O BALANÇO DE ENERGIA DE SUPERFÍCIE URBANO

### 2.2.1. Componentes do balanço de energia

Como visto na seção anterior, as condições sinóticas que promovem a formação de OC intensificam a entrada de radiação solar na superfície urbana e, desse modo, acarretam uma acentuação dos fluxos de energia térmica que ditam o subsistema termodinâmico das cidades. Esse subsistema é, segundo Monteiro (1975), um componente fundamental do clima urbano e o referencial básico para a compreensão do conforto térmico urbano.

As componentes termodinâmicas do clima não só conduzem ao referencial básico para a noção do conforto térmico urbano como são, antes de tudo, a constituição do nível fundamental de resolução climática para onde convergem e se associam todas as outras componentes (MONTEIRO, 1975, p. 163).

De uma forma geral, o subsistema termodinâmico das cidades é dominado por fluxos radiativos e não radiativos de energia que determinam as trocas energéticas que originam os regimes térmicos do solo, da água, da vegetação e do ar. O armazenamento e transferência de calor decorrentes desses fluxos num dado intervalo de tempo e área determinam o balanço de energia de superfície urbano (*surface energy balance*, SEB em inglês) (OKE et al., 1999).

As trocas térmicas ocorridas no ambiente urbano podem ser generalizadas pela equação do balanço de energia de superfície. Esta equação representa como a energia é transferida de e para as superfícies da Terra e é baseada na primeira Lei da Termodinâmica, que afirma que a energia não pode ser criada nem destruída, mas apenas transformada (OKE et al., 2017). Desse modo, a energia absorvida por uma superfície terrestre qualquer, seja proveniente da radiação solar ou de ação antropogênica, será transformada em calor e transferida para outro lugar. Conforme Oke et al. (2017), a equação do balanço de energia de superfície é teoricamente descrita como:

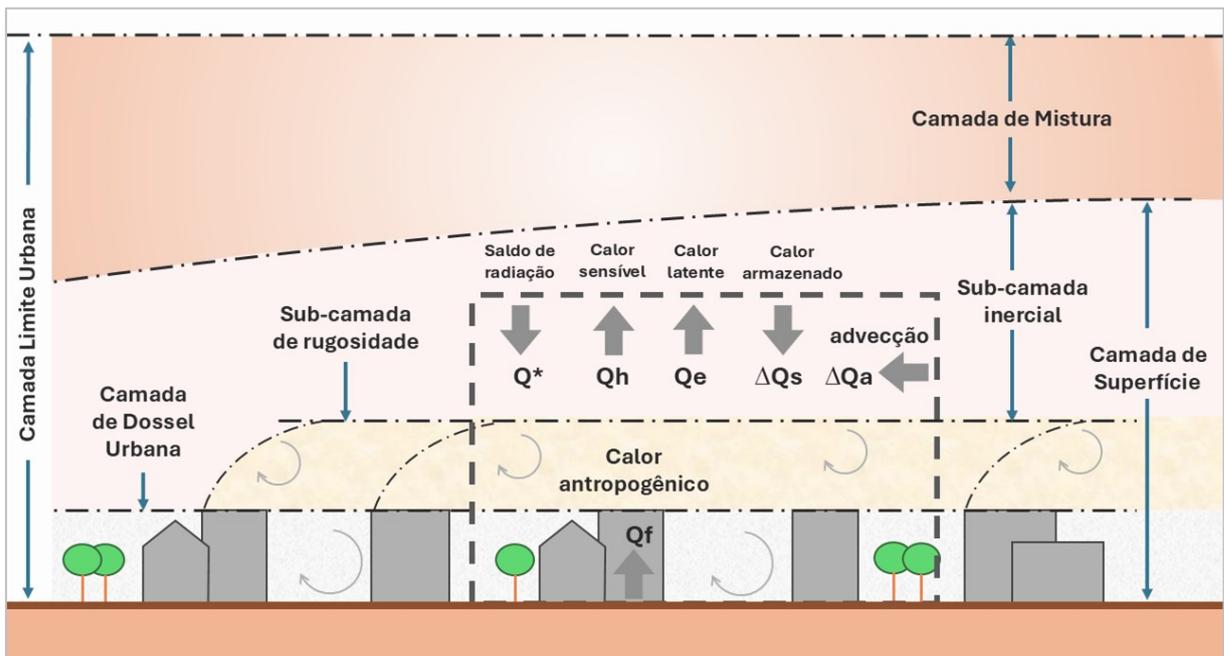
$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A, \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

- $Q^*$  - fluxo líquido de radiação, proveniente do sol e da atmosfera ( $W/m^2$ );
- $Q_F$  - liberações do calor antropogênico ( $W/m^2$ );
- $Q_H$  - fluxo de calor sensível ( $W/m^2$ );
- $Q_E$  - fluxo de calor latente ( $W/m^2$ );
- $\Delta Q_S$  - fluxo líquido de calor armazenado em um volume ( $W/m^2$ );
- $\Delta Q_A$  - advecção horizontal de energia ( $W/m^2$ );

Segundo Erell et al., (2011), o SEB é visto como um fenômeno de mesoescala ou escala local (dentro da Camada Limite Urbana), com a área construída representada como uma superfície texturizada (Camada de Dossel Urbano), que pode ser caracterizada por suas propriedades aerodinâmicas e térmicas médias. Desse modo, a equação do balanço de energia é o resultado da transferência entre a Camada de Dossel Urbano e a atmosfera, quantificada por medições ou modelagens, em uma altura representativa desses fluxos de toda a área urbana. Na Figura 5 são esquematizados os principais componentes da equação do balanço de energia dentro da Camada Limite Urbana.

Figura 5 - Esquema dos componentes do balanço de energia de superfície urbano.



Fonte: Adaptado de Erell et al., 2011, p. 28.

O fluxo líquido de radiação ou **balanço de radiação** ( $Q^*$ ) é a soma de toda a radiação de entrada ( $\downarrow$ ) e de saída ( $\uparrow$ ) em um volume, neste caso a atmosfera urbana (ROTH

et al, 2017). A radiação de entrada pode ser dividida em radiação solar incidente de onda curta ( $QI_{\downarrow}$ ) e de onda longa ( $QL_{\downarrow}$ ), sendo esta última decorrente do aquecimento da atmosfera pela superfície. A radiação de saída pode ser dividida em radiação solar de onda curta refletida ( $QI_{\uparrow}$ ) e radiação de onda longa emitida pela superfície ( $QL_{\uparrow}$ ).

A quantidade de radiação de onda curta incidente ( $QI_{\downarrow}$ ) na superfície depende da geometria entre o Sol e a superfície terrestre e é modulada pela transmissividade da atmosfera (STEWART, MILLS, 2021). Assim que entra na atmosfera, parte da  $QI_{\downarrow}$  será refletida a uma taxa que depende da composição da atmosfera e da distância percorrida e outra parte espalhada em direção à superfície da Terra como radiação difusa (BARRY, CHORLEY, 2009). A radiação de onda longa incidente ( $QL_{\downarrow}$ ) decorrente do aquecimento da atmosfera pela superfície é de caráter difuso, que pode ser tratada como proveniente da cúpula do céu. A  $QL_{\downarrow}$  é emitida por partículas presentes na atmosfera, como gotículas de vapor de água, nuvens, poluição e poeira. Desse modo, uma atmosfera mais quente com grande acúmulo de partículas resultará em mais emissão de radiação de onda longa (GARTLAND, 2008).

Apesar de simplificada pela equação, os intercâmbios de radiação térmica entre o Sol, a superfície e o ar são complexos, principalmente nos ambientes urbanos que afetam a absorção e reflexão da radiação de entrada e a emissão da radiação decorrente do aquecimento da superfície. Devido à natureza multifacetada da superfície urbana, a obtenção do saldo de radiação torna-se ainda mais difícil (BARBIRATO et al., 2007).

O **calor antropogênico** (QF) é energia térmica proveniente das atividades humanas e origina-se de diversas fontes, entre elas edifícios, processos industriais, veículos automotores e até mesmo pessoas (GARTLAND, 2008). O calor antropogênico apresenta variação diurna/semanal devido aos padrões de ocupação do solo e ao clima, o que pode impulsionar a necessidade de aclimatação mecânica em ambientes internos decorrente do frio ou calor sentido pela população (STEWART, MILLS, 2021). Juntamente com o balanço de radiação, o calor antropogênico representa as fontes de energia disponíveis da equação do balanço de energia de superfície.

Com a entrada de energia no meio urbano, a superfície redistribui e dissipa o calor na forma de fluxo de calor sensível (QH), fluxo de calor latente (QE), fluxo líquido de calor armazenado ( $\Delta QS$ ) e advecção horizontal de energia ( $\Delta QA$ ). A grande variedade de

tipos de superfície urbana, além das diferentes áreas expostas à radiação solar direta, conduz a uma variação significativa dos fluxos de calor (FEIGENWINTER et al., 2018).

O **fluxo de calor sensível** (QH) descreve a energia contida em um volume e está associada à mudança de temperatura do ar (STEWART, MILLS, 2021). O QH é transferido por convecção entre o ar e as superfícies adjacentes quando há diferença de temperatura entre os dois meios. Este processo de transferência de calor depende da magnitude da diferença de temperatura e a resistência a transferência de calor entre os meios. O fluxo de calor sensível apresenta-se como um dos principais componentes na formação de UHI (OKE et al., 1982).

Importante ressaltar que os fluxos turbulentos do ar tendem a reduzir os gradientes de temperatura dentro do cânion urbano, alcançando valores menores que 1 °C (MORIWAKI et al., 2004). Contudo, em situações de estagnação do vento, as diferenças de temperatura dentro do cânion urbano podem ser superiores a 1 °C, dado que, ao longo do cânion, há grande variação da temperatura de superfície decorrente de áreas expostas ao sol ou ao sombreamento dos edifícios (ERELL et al., 2011).

O **fluxo de calor latente** (QE) é a energia associada a mudança do estado físico de uma substância, que para o estudo do balanço de energia urbano é a água. Embora também descreva a energia contida em um volume, o calor latente não se traduz no aumento da temperatura do ar e nem é sentida pelos humanos. Grande parte do fluxo de calor latente do meio urbano é realizado pela evaporação da água presente nos corpos d'água, nos solos úmidos e na transpiração da vegetação (GARTLAND, 2008). As pesquisas demonstram que tanto QE quanto QH atingem o seu pico no período da tarde (KONG et al., 2023; WEI et al., 2024)

Quanto ao **fluxo líquido de calor armazenado** ( $\Delta QS$ ), este componente da equação do SEB representa parte da energia dissipada pelos edifícios, vegetação, solo e a camada de dossel urbano. Devido à inércia térmica da cidade, o  $\Delta QS$  libera o calor armazenado durante o dia ao longo da noite, o que o torna um fator fundamental na formação da UHI noturna (GRIMMOND et al., 1999). Em estudo realizado na cidade de Singapura, Roth et al. (2016) observaram que o pico de armazenamento de calor pelas superfícies urbanas aconteceu 1 hora antes do meio-dia solar e a perda de calor para a atmosfera ocorreu a partir das 16:00 da hora solar. Ou seja, como observado

em outros estudos, o calor armazenado durante o dia começa a ser liberado antes do pôr do sol (OKE et al., 1999).

O último componente da equação, a **advecção horizontal de energia** ( $\Delta QA$ ), representa a diferença horizontal de energia decorrente de QH e QE. Segundo Roth et al. (2017), apesar de compor a equação, a dificuldade na obtenção de suas informações, que exige densa rede de sensores, leva grande parte dos estudos de campo e modelos a considerarem nulo o valor de  $\Delta QA$ , uma vez que assumem uma área extensa e relativamente homogênea de superfície urbana, onde as diferenças horizontais são insignificantes.

A compreensão do particionamento dos fluxos de energia é fundamental para entender e modelar o clima urbano, a qualidade ambiental e os processos climáticos locais (CHOW et al., 2014). Alguns estudos demonstram que a maior parte da energia é direcionada para  $\Delta QS$ , seguida pelo QH e pelo QE. Como exemplo, Oke et al. (1999) identificaram que 58% da radiação líquida foi armazenada nos edifícios e no solo, 38% foi perdida por QH e apenas 4% foi usada para evaporação (QE), em estudo realizado na Cidade do México. Na cidade de São Paulo, Ferreira (2010) analisou a variação diurna e sazonal da perda de calor dos componentes do SEB em 2004. Para o período diurno, no mês de fevereiro, os fluxos de calor armazenado, sensível e latente corresponderam, respectivamente, a 67%, 30% e 3,7%. Para o mês de agosto, os valores corresponderam a 62% , 34% e 4,3%, respectivamente.

Observa-se que estes estudos evidenciam o predomínio de superfícies impermeabilizadas em áreas urbanas, em detrimento de áreas verdes, o que favorece a retenção de calor e elevação da temperatura do ar. Conforme Ferreira (2010), as superfícies impermeáveis (entre eles edifícios, muros e solos pavimentados) são os grandes responsáveis pelo armazenamento de energia no dossel urbano, devido à sua maior admitância térmica em comparação com superfícies naturais (solo exposto e áreas verdes).

Segundo Erell et al. (2011), após a entrada da radiação solar na camada de dossel urbano, a quantidade de energia solar que é refletida à atmosfera, ao invés de ser absorvida e aquecer a superfície, é determinada pelas propriedades térmicas dos materiais de superfície (albedo e emissividade) e pelo arranjo tridimensional dos elementos que compõem o ambiente construído.

O **albedo** ( $\alpha$ ) relaciona-se à reflexão da radiação solar de onda curta de uma dada superfície e varia de 0 a 1,0 (Tabela 2). Materiais de superfície com alto valor de albedo têm menor impacto na temperatura da superfície, devido à menor quantidade de energia absorvida para geração de calor. O valor médio do albedo medido em campo para uma área urbanizada é de 0,14, porém em modelagens numéricas do clima, valores entre 0,23 e 0,40 têm alcançado melhores resultados (ERELL et al., 2011). A **emissividade** ( $\epsilon$ ) é a capacidade de emissão de radiação de onda longa pela superfície de um determinado material e varia de 0,0 (reflexão total) a 1,0 (irradiação total) (Tabela 2). A absorção da radiação térmica resulta em aquecimento e a absorvância térmica (capacidade de absorção) é igual à emissividade (STEWART, MILLS, 2021). Cabe ressaltar que a emissividade de um material varia com a temperatura, o comprimento de onda da radiação e o tipo de acabamento de superfície (OKE et al., 2017).

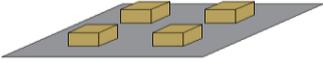
Tabela 2 - Propriedades radiativas de materiais urbanos

<b>Superfície</b>	<b>Albedo (<math>\alpha</math>)</b>	<b>Emissividade (<math>\epsilon</math>)</b>
<b>Superfícies Naturais</b>		
Solo Exposto (claro, seco)	0,12 – 0,18	0,84 – 0,92
Vegetação rasteira	0,16 – 0,26	0,90 – 0,98
Florestas (decíduas)	0,13 – 0,20	0,90 – 0,99
Água (Altura solar > 60°)	0,03 – 0,10	0,92 – 0,97
<b>Superfícies Urbanas</b>		
<b>Ruas</b>		
Asfalto	0,05 – 0,27	0,86-0,96
<b>Paredes</b>		
Concreto	0,10 – 0,35	0,85 – 0,97
Tijolos	0,20 – 0,60	0,90 – 0,92
Pedras (vermelha e cinza)	0,20 – 0,45	0,85 – 0,95
<b>Pinturas</b>		
Branças	0,50 – 0,90	0,85 – 0,95
Preta	0,02 – 0,15	0,90 – 0,98
<b>Áreas Urbanas</b>		
Variações	0,09 – 0,23	0,94 – 0,96
Médias	0,14	0,95

Fonte: Adaptado de Oke et al. (2017), p. 129 e 130.

A variada geometria e dimensão dos edifícios das áreas urbanas afeta a reflexão da radiação em diferentes maneiras, o que torna a radiação solar refletida ( $QI \uparrow$ ) a mais modificada dos quatro componentes do balanço de radiação (CHRISTEN, VOGT, 2004). Além disso, o variado arranjo tridimensional das edificações pode induzir a uma redução do albedo urbano (Figura 6). Conforme Amorim (2021), superfícies expostas a radiação solar que apresentam elevado albedo e emissividade, tendem a absorver menos radiação e refletir mais radiação para o espaço, transmitindo menos calor para o ambiente. De modo contrário, superfícies com baixos valores de albedo e emissividade tendem a reter mais calor no ambiente.

Figura 6 - Efeitos da forma urbana nos valores do albedo sobre uma mesma área.

Forma Urbana	H / W	$\lambda_c$	Albedo	Mudança Absorção
	0	1	0.40	
	0.5	1.5	0.32	+17%
	1	2	0.27	+21%
	2	3	0.23	+27%

\* H/W – relação entre a altura do cânion urbano e a largura da via;  $\lambda_c$  - proporção da área de todas as superfícies dos edifícios, incluindo o terreno, pela área total da superfície.

Fonte: Adapado de Oke et al., 2017, p. 141.

Como as características da superfície controlam significativamente o particionamento do balanço de energia e, conseqüentemente, atuam na formação do clima das cidades, torna-se importante obter informações detalhadas da estrutura tridimensional urbana, do uso e cobertura do solo e de materiais típicos (CHRISTEN, VOGT, 2004). Assim, diversos estudos empregam classificações de acordo com parâmetros morfométricos, entre eles o fator de visão de céu, a densidade de edificações, o fator de cobertura do solo, altura média de edifícios e fração de áreas verdes (OKE et al., 2017).

### **2.2.2. Influência das Ondas de Calor no balanço de energia de superfície**

Alguns estudos se propuseram a avaliar o impacto dos eventos extremos de calor no balanço de energia de superfície urbana. De uma forma geral, indicam que as condições sinóticas que favorecem a formação de OC influenciam o comportamento de seus componentes, devido a maior entrada de radiação solar, alteração na disponibilidade de umidade no solo e mudanças nos regimes de ventos (GEIRINHAS et al., 2019; KONG et al., 2023).

As magnitudes dos totais diários dos fluxos de energia são principalmente uma consequência das condições de nebulosidade, que impactam a quantidade de radiação que chega à superfície urbana, em vez das mudanças de ângulo solar decorrente das estações do ano (ROTH et al., 2017). Assim, em um cenário de OC, a formação de nuvens é geralmente restringida pela presença de bloqueios atmosféricos, favorecendo a entrada de radiação solar e o armazenamento do calor no ambiente urbano.

No que diz respeito a disponibilidade de umidade no solo, alguns estudos identificaram uma liberação contínua dos fluxos de calor latente em dias anteriores a ocorrência de uma OC, tornando o solo seco e favorecendo o acúmulo dos fluxos de calor sensível (LIBONATI et al., 2022; WEI et al., 2024). Dessa forma, há uma predominância dos fluxos de calor sensível em dias de OC que promovem ainda mais a elevação da temperatura do ar próximo à superfície.

Este cenário pode ser melhor compreendido a partir de estudos que se propuseram a avaliar o particionamento dos fluxos de energia durante OC. Com base em uma extensa rede de torres de fluxo localizadas na região centro-oeste da Europa, Teuling et al. (2010) analisaram os componentes do SEB em florestas e pastagens/grama durante períodos com e sem OC. Os autores demonstraram uma maior entrada de radiação (+221 W/m<sup>2</sup>) para os dias com OC, reflexo da baixa cobertura de nuvens. Nos dois períodos, o saldo de radiação ( $Q^*$ ) e o fluxo de calor sensível ( $QH$ ) foram maiores sobre as florestas do que nas pastagens, diferentemente do fluxo de calor latente ( $QE$ ), que teve comportamento contrário. Os autores atribuem o maior saldo de radiação às florestas devido à maior rugosidade superficial, que reduzem os fluxos turbulentos sobre elas, e às diferentes respostas térmicas da fisiologia estomática das árvores à radiação.

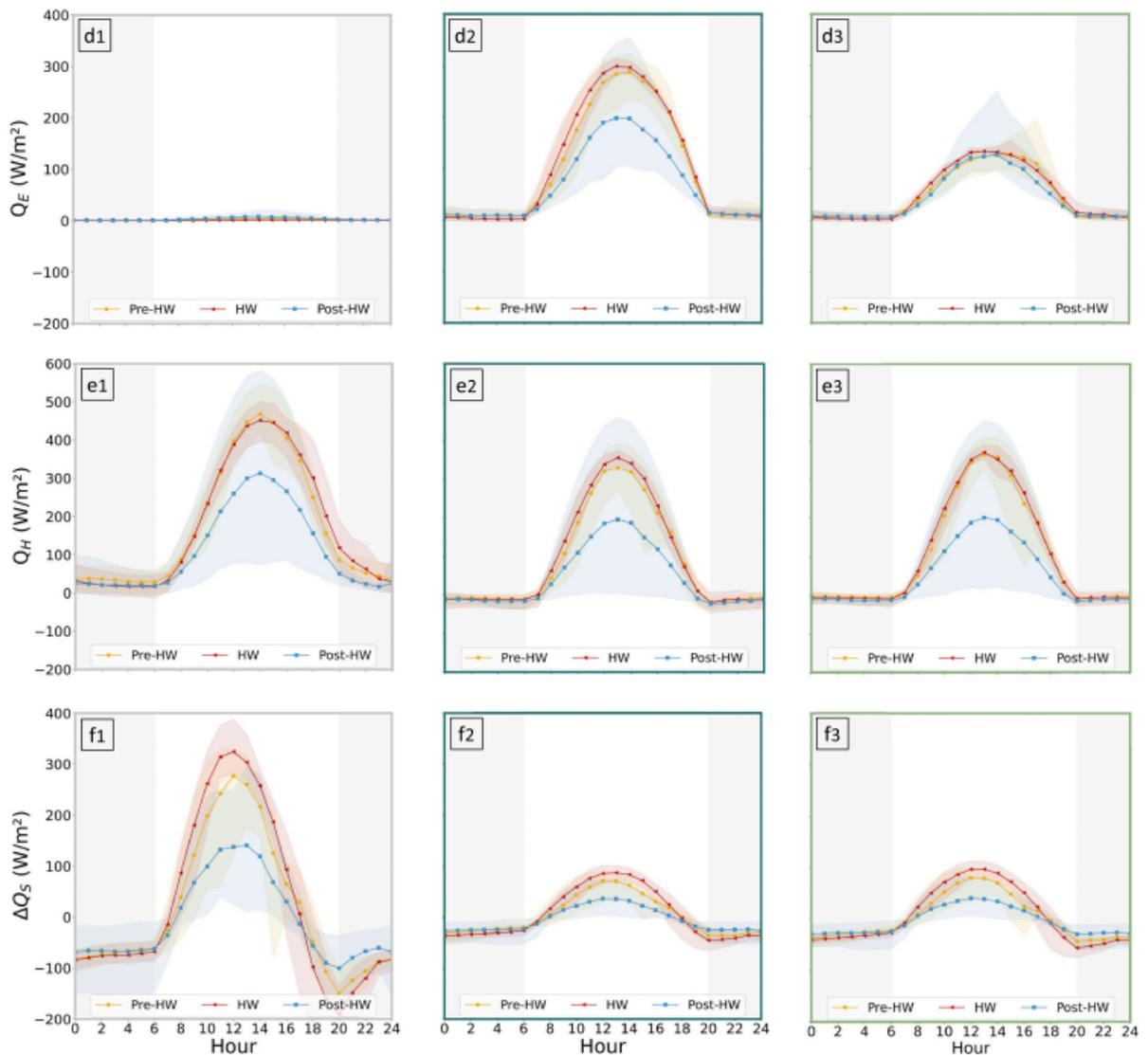
Na cidade costeira de Sydney, Austrália, Kong et al., (2023) quantificaram as variações dos fluxos de energia em diferentes tipos de solo (áreas urbanas, florestas e savanas) em dias sem e com OC (Figura 7). Quanto à radiação solar, os autores observaram que a magnitude de  $Q^*$ ,  $QI_{\downarrow}$  e  $QI_{\uparrow}$  aumentaram durante o dia, com pico ao meio-dia, nos três tipos de solo durante as OC, em parte decorrente da baixa nebulosidade. Uma maior discrepância entre os tipos de solo foi observada em  $QI_{\uparrow}$ , devido a variação de albedo. Quanto aos fluxos não radiativos, QH apresentou valores máximos nas áreas urbanas tanto em dias pré e com OC, próximos a  $470 \text{ W/m}^2$  ao meio-dia, com redução no período pós-OC, valores inferiores a  $300 \text{ W/m}^2$ . Nas florestas houve um leve aumento de QH em dias com OC, com valor total próximo de  $300 \text{ W/m}^2$ , e nas savanas houve mínima variação entre dias pré e com OC, com valores totais similares as florestas. Os registros de QE mostraram mínima produção de calor latente nas áreas urbanas, tanto em dias com e sem OC, próximos a  $0 \text{ W/m}^2$ . As florestas apresentaram os maiores valores em dias com OC, próximos aos  $300 \text{ W/m}^2$ , que foi aproximadamente o dobro das savanas. Por fim,  $\Delta QS$  apresentou um aumento durante as OC e redução nos dias seguintes nos três tipos de superfície. Foram registrados valores máximos próximos ao meio-dia nas áreas urbanas acima de  $300 \text{ W/m}^2$  e nas florestas e savanas próximos a  $100 \text{ W/m}^2$ .

Em estudo similar, WEI et al. (2024) avaliaram componentes do SEB em períodos pré e durante Ondas de Calor (119 eventos) em Shenzhen, China, a partir de um modelo de balanço de energia fundamentado em processos estomáticos. Os autores identificaram que, durante as OC, QH apresentou pouca alteração nos fluxos dos corpos d'água (a menos afetada entre as superfícies) e aumento nos registros das áreas verdes e superfícies impermeáveis, esta última a mais impactada entre as avaliadas. Já QE apresentou pouca alteração nas áreas verdes (a superfície mesmo afetada pelas OC), aumento nos corpos d'água e elevação mínima nas superfícies impermeáveis, registrando os menores valores de QE.

Com base nos estudos demonstrados, conclui-se que em dias de OC as áreas urbanas, representadas principalmente por superfícies impermeáveis, podem apresentar valores elevados de QH e  $\Delta QS$  e pouco modificados de QE, em comparação com as áreas verdes. Já as áreas vegetadas mostram-se menos afetadas pelas OC, com leve aumento de QH, QE e  $\Delta QS$  em dias de calor extremo e que pode variar a depender do tipo de vegetação. Apesar das valiosas contribuições

dos estudos, mais pesquisas devem ser realizadas para uma melhor compreensão do particionamento do SEB considerando diferentes definições de OC, em especial as que utilizam tanto a temperatura máxima quanto a mínima, e em cidades tropicais litorâneas em países do Sul Global, onde há grande diversidade no uso e ocupação do solo urbano.

Figura 7 – Média horária espacial de  $Q_E$ ,  $Q_H$  e  $\Delta Q_S$  em períodos pré-OC, durante OC e pós-OC.



Nota: A área sombreada em cinza representa o período noturno e as áreas sombreadas em amarelo, azul e vermelho representam o desvio padrão.

Fonte: Adaptado de Kong et al. (2023).

## 2.3. O ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO PET

### 2.3.1. Parâmetros do índice PET

Segundo Freitas e Grigorieva (2017), mais de 160 índices de conforto térmico foram propostos nos últimos 100 anos, tanto para ambientes internos quanto externos. Dentre os índices de ambientes externos, destacam-se os modelos baseados na Temperatura Equivalente, que são definidos como a temperatura do ar de um típico ambiente fechado que reproduz as mesmas respostas fisiológicas do corpo humano, quando sob a influência das condições de uma ambiente real (LAI et al., 2020).

Dentre os indicadores baseados nos modelos de Temperatura Equivalente, destaca-se o índice de Temperatura Equivalente Fisiológica (*Physiological Equivalent Temperature*, PET em inglês), que, segundo Potcher et al. (2018), é amplamente utilizado em diversas zonas climáticas do mundo, com o intuito de classificar a percepção térmica humana de cada localidade. Este índice foi apresentado por Höppe e Mayer, em 1987, e é baseado no Modelo Climático de Michel (*Munich Energy-Balance Model*, MEMI em inglês) (HÖPPE, 1999).

O PET (°C) é definido por Höppe (1999) como a temperatura fisiológica equivalente de um dado espaço (interior ou exterior) e é equivalente a temperatura do ar na qual, em um cenário interno típico, o balanço de energia do corpo humano é mantido com as temperaturas da pele e do centro do corpo igual àquelas sob as condições que estão sendo avaliadas. Para isso, o balanço térmico do corpo deve ser considerado com base em uma taxa metabólica de 80W e uma resistência da vestimenta ao calor de 0,9 clo.

Ainda de acordo com Höppe (1999), as seguintes considerações são feitas para o ambiente de referência:

- a temperatura radiante média igual a temperatura do ar ( $T_{rm} = T_a$ );
- velocidade do ar igual a 0,1 m/s;
- pressão de vapor igual a 12hPa (aproximadamente equivalente para uma umidade relativa de 50% a  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ).

Com estas considerações, o cálculo do PET consiste, basicamente, em duas etapas: a primeira refere-se aos cálculos das condições térmicas do corpo com o MEMI para uma determinada condição de parâmetros meteorológicos, e a segunda refere-se à inserção dos valores calculados para a temperatura da pele e do centro do corpo no

modelo MEMI e resolução de equações para determinar a  $T_a$ , com as três considerações acima (HÖPPE, 1999). O valor da  $T_a$  obtido equivale ao valor do PET, em ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Como mencionado, o cálculo do PET requer informações de parâmetros meteorológicos do lugar para a estimativa do balanço energético do corpo humano. Segundo Matzarakis et al. (1999), os parâmetros meteorológicos de um ambiente que dominam o balanço energético humano são a temperatura do ar ( $T_a$ ), a pressão de vapor (PV), a temperatura radiante média (TRM) e a velocidade do vento (Vv). A influência destes atributos nos valores de PET é fruto das características físicas ambientais, que determinam as trocas térmicas convectivas, radiativas, evaporativas e respiratórias entre o corpo humano e o meio circundante (LAI et al., 2020). De uma forma geral, o aumento da temperatura do ar e/ou temperatura radiante média conduz a um aumento nos valores de PET, enquanto o aumento da velocidade do vento tem efeito oposto nos valores do índice.

Os efeitos termofisiológicos de cada parâmetro meteorológico no balanço energético humano e consequente impacto nos valores do índice PET foram avaliados em diversos estudos. Algumas pesquisas demonstram que a temperatura do ar é o mais importante parâmetro para a determinação do PET, dentre os quatro parâmetros meteorológicos. Como exemplo, Tsitoura et al. (2014) avaliaram as condições do conforto em espaços abertos na ilha de Creta, Grécia, por meio de quatro índices de conforto térmico. Os autores concluíram que a temperatura do ar e a radiação solar são os determinantes mais críticos dos votos de conforto (com um  $r^2 = 0,87$  para temperatura do ar e um  $r^2 = 0,82$  para radiação solar). Os autores ainda relataram que a umidade do ar e a velocidade do vento apenas tiveram efeitos em momentos de desconforto térmico. Liu et al. (2016) avaliaram o impacto dos quatro parâmetros no conforto térmico de usuários de um espaço público em Changsha, China, por meio de análise de variância multivariada. Os resultados demonstraram que a contribuição da temperatura do ar na sensação térmica foi próxima a 65% dentre os demais parâmetros. Contudo, os autores alertam que esta contribuição está relacionada a estação do ano, e que no inverno a contribuição da radiação solar foi superior.

Outras pesquisas, porém, indicam a temperatura radiante média como a principal variável que governa as condições de conforto térmico, especialmente em dias ensolarados (KÁNTOR, UNGER, 2011). Cohen et al. (2012) apresentaram o impacto

de espaços verdes da cidade de Tel Aviv, Israel, na sensação térmica humana. Os autores concluíram que a Trm se mostrou o parâmetro meteorológico mais influente, porém alertam que este efeito depende das características do lugar (sombreado ou exposto a radiação) e da estação do ano. No verão, a Trm foi a variável dominante, especialmente nas áreas expostas, enquanto nas áreas verdes bem sombreadas, o efeito foi levemente superior ao de Ta. Os resultados de Cohen et al. (2012) estão em acordo com o estudo de Holst e Mayer (2011) que avaliaram os efeitos de diferentes cânions urbanos da cidade de Freiburg, Alemanha, nos valores das variáveis TRM, PET e Ta. Os autores identificaram que a TRM mostrou forte dependência da geometria urbana e apresentou o mais pronunciado efeito no PET em dias típicos de verão, enquanto a Ta foi pouco afetada pelas diferentes configurações dos cânions urbanos.

Santamouris (2004) destaca o papel da ventilação urbana na influência da temperatura do ar e da temperatura radiante média no conforto térmico humano. Segundo o autor, em dias quentes com alta entrada de radiação solar, o conforto térmico é tão sensível à temperatura radiante média quanto à temperatura do ar em momentos de baixa velocidade do ar. Porém, em momentos de velocidades mais altas, a temperatura do ar determina a percepção de conforto, e a velocidade do ar tem um maior impacto.

No que diz respeito ao conforto/desconforto humano em períodos quentes, o vento age ao menos de duas formas: ao influenciar as trocas térmicas entre o corpo e o ar do meio ambiente circundante, proporcionalmente à velocidade do ar através da convecção; e ao aumentar a evaporação do suor, o que acelera o resfriamento da pele (YUAN, 2018). Dessa forma, estudos de conforto térmico tem demonstrado a relação entre o vento e os efeitos nos valores do índice PET.

Na cidade de Freiburg, Alemanha, o efeito da velocidade do vento registrada por instrumentos de diferentes altitudes nos valores do índice PET foi avaliada por Fröhlich et al. (2019). Os autores demonstraram que a correção da velocidade do vento de 3,0 m/s, de uma torre anemométrica de 62 m de altura, para 0,9 m/s, equivalente a altura do centro gravitacional de um corpo humano médio (1,1 m acima do nível do solo), impactou o aumento do PET (°C) em 2,60°C. Este estudo demonstra a importância da informação do vento a altura do pedestre, que é uma exigência para o cálculo do PET (HÖPPE, 1999).

Fröhlich e Matzarakis (2018) realizaram testes no modelo microclimático Rayman para demonstrar a influência da velocidade do vento no índice PET. Os cálculos foram realizados assumindo que os valores de  $T_a$  (°C) e TRM (°C) eram iguais e que o percentual de umidade relativa do ar (%) era de 60%. Os parâmetros humanos também foram considerados constantes. Os testes consideraram três cenários de  $T_a = T_{rm}$  (°C) com cinco valores de velocidade do vento em m/s (0,5; 1,0; 3,0; 5,0; e 10,0) cada. Como pode ser visto no Tabela 3, em todos os cenários, observa-se uma redução do PET (°C) com o aumento da velocidade do vento.

Tabela 3 - Influência da velocidade do vento no índice PET calculado no modelo Rayman.

<b>Ta = Trm (°C)</b>	<b>Velocidade do vento (m/s)</b>				
	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>
<b>0,0</b>	-2,9	-4,3	-6,4	-7,2	-8,1
<b>20,0</b>	18,3	17,2	15,4	14,6	13,8
<b>30,0</b>	29,9	29,4	28,4	27,7	26,7

Fonte: Fröhlich e Matzarakis (2018)

Ressalta-se o cenário da temperatura mais alta (30,0°C), em que os resultados demonstram que a uma baixa velocidade do vento (0,5 m/s) há pouco impacto no valor do PET, com uma redução de apenas 0,1°C. Quando a velocidade do vento alcança valores entre 1,0 m/s e 5,0 m/s, os valores de PET passam a apresentar uma maior redução, numa proporção próxima de 1:0,5, ou seja, para cada aumento de 1,0 m/s na velocidade do vento, o PET reduziu 0,5°C. Com o vento a 10,0 m/s, a redução no PET foi de 3,3 °C.

Xie et al., 2018 avaliaram o conforto térmico em espaços abertos segundo a sensibilidade de indivíduos à velocidade do vento no campus da Universidade Politécnica de Hong Kong, China. Os autores demonstraram que a sensibilidade aos ventos foi maior em ambientes mais quentes e que a mudança de velocidade de vento de tipo brisa para tipo moderado criou um considerável efeito refrescante, quando a temperatura operativa esteve abaixo de 34,00°C.

Apesar do reconhecido efeito atenuante do vento no estresse térmico identificado nas pesquisas acima, Roshan et al. (2020) alertam que o potencial do vento na amenização do conforto térmico pode variar conforme os diferentes tipos climáticos de um país, já que são resultados de diferentes sistemas atmosféricos, direções de ventos e condições térmicas. Como exemplo, Anjos et al. (2020) identificaram que o

desenvolvimento de Frentes de Brisa Marítima (*Sea Breeze Front*, SBF em inglês), na cidade de Aracaju, tiveram um impacto negativo no conforto térmico. Todos os dias com a formação da SBF apresentaram valores mais altos do índice PET comparados aos dias sem SBF, com uma diferença máxima de 3,80°C, devido a maior entrada de radiação solar direta na área de estudo.

### 2.3.2. Escalas de conforto e sensação térmica do índice PET (°C)

Apesar dos modelos baseados na Temperatura Equivalente serem de fácil interpretação, o valor final da temperatura obtido pelo índice não está diretamente relacionado à sensação térmica (LAI et al., 2020). Desse modo, é necessário a realização de estudos que associem o valor da temperatura equivalente a informações de sensação térmica, obtidos em pesquisa de campo e testes subjetivos, que retratam os diferentes graus de estresse fisiológico de uma determinada população.

A primeira proposta de uma escala de sensação térmica para o índice PET foi realizada por Matzarakis e Mayer em 1996 (*apud* MATZARAKIS et al., 1999). Como pode ser visto no Quadro 1, a escala de PET (°C) proposta contém nove faixas de percepção térmica, e de grau de estresse fisiológico, com variação relacionadas ao frio e ao calor.

Quadro 1- Escala do índice PET proposto por Matzarakis et al. (1999)

PET (°C)	Percepção Térmica	Grau de estresse fisiológico
Abaixo de 4	Muito frio	Extremo estresse de frio
4 - 8	Frio	Forte estresse de frio
8 - 13	Pouco frio	Moderado estresse de frio
13 - 18	Ligeiramente frio	Leve estresse de frio
18 - 23	Confortável	Sem estresse térmico
23 - 29	Ligeiramente calor	Leve estresse ao calor
29 - 35	Pouco calor	Moderado estresse ao calor
35 - 41	Calor	Forte estresse ao calor
Acima de 41	Muito Calor	Extremos estresse ao calor

Fonte: Adaptado de Matzarakis et al., 1999.

Com esta escala, pode-se, portanto, avaliar a percepção térmica de habitantes de uma região a partir dos resultados obtidos pelos cálculos do PET. Como exemplo, para um PET de valor 20,0°C, a tabela indica que habitantes de uma região apresentam uma percepção térmica de conforto (faixa confortável), com nenhum grau de estresse

térmico. Apesar da interpretação simplificada do índice, Matzarakis et al. (1999) recomendaram a realização de pesquisas em diferentes lugares, com o intuito de calibrar (adequar) as escalas de PET às diferentes realidades climáticas no mundo.

Desde então, inúmeras pesquisas elaboraram escalas de sensação térmica em diferentes zonas climáticas para o índice PET, com base na percepção subjetiva de indivíduos. Uma extensa revisão de estudos publicados entre os anos de 2001 e 2017, que também incluem outros indicadores de conforto térmico, pode ser vista em Potcher et al. (2018). Para o índice PET, os autores concluíram que para regiões de clima quente, 87% dos estudos indicaram a faixa de conforto térmico Neutra entre os valores 24,00 - 27,00°C.

No Brasil, os estudos de calibração do índice PET podem ser encontrados nas cidades de Belo Horizonte (HIRASHIMA, 2018), Campo Grande (LUCCHESI, ANDREASI, 2017), Cuiabá (RIBEIRO et al., 2022), Salvador (ANDRADE et al., 2016), São Paulo (MONTEIRO, 2008) e Vitória (SILVA, ALVAREZ, 2015). Por exemplo, para a cidade de Belo Horizonte, a faixa Confortável está enquadrada entre os valores de 16,0°C e 30,0°C, enquanto na cidade de Cuiabá, a faixa está entre os valores 23,0°C e 34,6°C.

Quadro 2 - Escalas do índice PET propostos por estudos brasileiros.

Percepção Térmica	Cidades					
	BH*	CG*	CU*	SA*	SP*	VI*
Muito frio	-	≤ 11	-	-	≤ 4,0	-
Frio	≤ 12	11 - 15	-	-	4 - 12	18 - 20
Pouco frio	13 - 15	15 - 21	≤ 23,0	-	12 - 18	20 - 22
Confortável	16 - 30	21 - 27	23 - 34,6	≤ 26,8	18 - 26	22 - 30
Pouco calor	31	27 - 32	34,7 - 37,6	26,8 - 29,4	26 - 31	30 - 34
Calor	32 - 35	> 32	37,6 - 43,4	29,4 - 34,1	31 - 43	34 - 46
Muito Calor	> 36	-	≥ 43,4	≥ 34,1	≥ 43	> 46

\*BH (Belo Horizonte), CG (Campo grande), CU (Cuiabá), SA (Salvador), SP (São Paulo) e VI (Vitória).

Fonte: Adaptado de Hirashima (2018), Lucchese e Andreasi (2017), Ribeiro et al. (2022), Andrade et al. (2016), Monteiro (2008) e Silva, Alvarez (2015).

Como pode ser visto no Quadro 2, os valores limites e amplitude de cada faixa de percepção térmica mostram variações significativas. Os diferentes intervalos de PET apresentados nos estudos indicam que pessoas de diferentes culturas e residentes em diferentes zonas climáticas, podem estar melhor adaptadas a uma determinada

faixa de sensação térmica do que outras. Isso reforça a necessidade de calibração deste índice para as distintas zonas climáticas de um país ou região.

### **2.3.3. Estimativa do PET por modelagem numérica**

Uma alternativa às medições bioclimáticas de campo para a estimativa do índice PET (que apresentam alta acurácia, mas são empreendimentos custosos e demorados) é a modelagem numérica de microescala. Este método permite a avaliação do PET em diferentes cenários urbanos, além contribuir na compreensão da variabilidade espacial e temporal das condições de conforto térmico humano em espaços abertos (GÁL, KÁNTOR, 2020). Dadas as vantagens da modelagem e o aumento dos recursos computacionais em computadores pessoais nos últimos anos, diversas ferramentas surgiram para facilitar estimativa do índice PET. Dentre os modelos numéricos mais utilizados, podem ser citados o Rayman Pro, o ENVI\_met e o UMEP.

O modelo microclimático Rayman foi desenvolvido para calcular fluxos de radiação em ambientes simples e complexos e estimar tanto temperatura radiante média quanto diferentes índices térmicos, o que permite a quantificação do conforto térmico de diferentes regiões e climas (FRÖHLICH, MATZARAKIS, 2019). O modelo é unidimensional no espaço, o que significa que todos os cálculos são realizados para um único ponto. Dentre os três modelos citados anteriormente, é o mais utilizado no mundo por ser gratuito (pacote de software baseado no Windows), apresentar uma interface simples e exigir poucos parâmetros meteorológicos e espaciais para as estimativas de  $T_{rm}$  e PET. Apesar de suas vantagens, o Rayman não dispõe de recursos gráficos avançados para uma adequada representação das informações da superfície urbana, entre elas o tipo de cobertura do solo (Figura 8). Mais informações sobre performance e validação do modelo podem ser obtidas nos trabalhos de Matzarakis et al. (2007, 2010) e Krüger et al. (2014).

Figura 8 – Área de trabalho do modelo microclimático Rayman Pro.

The screenshot shows the RayMan Pro software interface with the following sections and data:

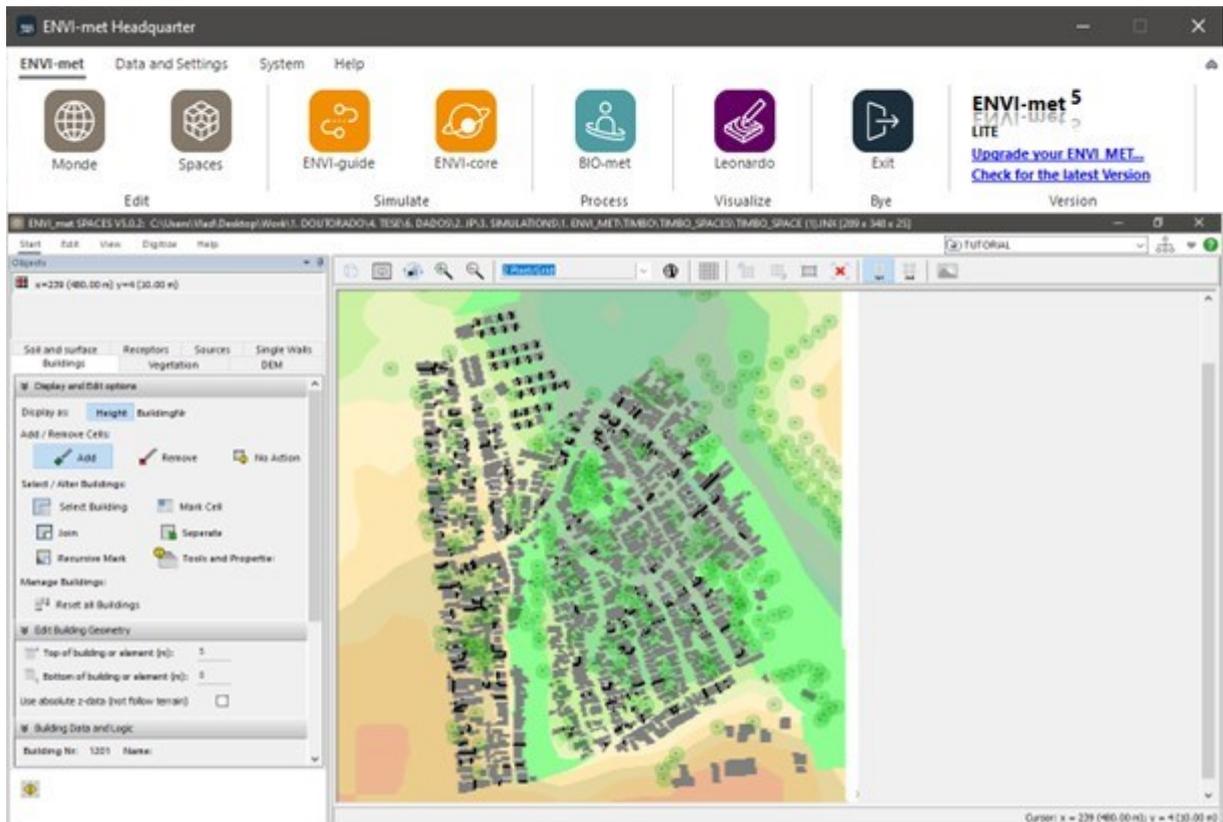
- Date and time:** Date (day.month.year) 13.4.2024, Day of year 104, Local time (h:mm) 13:00. Button: Now and today.
- Geographic data:** Location: João Pessoa. Buttons: Add location, Remove location. Geogr. longitude (°E) -34°47', Geogr. latitude (°N) -7°9', Altitude (m) 0, Timezone (UTC + h) -3.0.
- Current data:** Air temperature Ta (°C) 30.2, Vapour pressure VP (hPa) 28.8, Rel. humidity RH (%) 67.3, Wind velocity v (m/s) 1.2, Cloud cover N (octas) 0.0, Surface temperature Ts (°C) [empty], Global radiation G (W/m²) [empty], Mean radiant temp. Tmrt (°C) 45.1.
- Personal data:** Height (m) 1.70, Weight (kg) 69.0, Age (a) 36, Sex m.
- Clothing and activity:** Clothing (clo) 0.40, Activity (W) 144.0, Position standing,  Auto Standard Clo for mPET.
- Thermal indices:**  PMV,  PET,  SET\*,  UTCI,  PT,  mPET.
- Calculation:** Buttons: New, Add.
- Buttons:** Close.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ENVI\_met é um modelo microclimático tridimensional, prognóstico e de alta resolução espacial elaborado para simular interações superfície-planta-ar (BRUSE, 2004). É considerado um modelo de dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD em inglês) não hidrostático que se utiliza das médias de Reynolds das equações de Navier-Stokes. No que se refere à execução do modelo, não há nenhum aplicativo central realizando todo o trabalho tal qual o Rayman Pro, mas uma coleção de vários aplicativos independentes para diferentes estágios e tarefas do fluxo de trabalho (Figura 9).

Diferente do Rayman, para utilizar todo o potencial do ENVI\_met é necessário o pagamento de licenças, que variam segundo políticas do desenvolvedor. Desse modo, muitos estudos que empregaram o modelo em pesquisa de conforto térmico trabalharam com a versão gratuita, uma opção de entrada com menor possibilidades de configurações. Uma ampla revisão de estudos que validaram o ENVI\_met pode ser vista em Tsoka et al. (2018).

Figura 9 - Coleção de aplicativos do ENVI\_met (v. 5.02) e área de trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o modelo *Urban Multi-scale Environmental Predictor* (Preditor Ambiental Urbano de Multiescala, UMEP em inglês) é uma ferramenta integrada para aplicações de climatologia e planejamento urbano, implementada no software de geoprocessamento QuantumGIS (QGIS) (LINDERBERG et al., 2018). A partir do plugin SpatialTC (*Spatial Thermal Comfort*), o UMEP pode gerar mapas de diferentes índices de conforto térmico, entre eles o PET ( $^{\circ}\text{C}$ ), em alta resolução espacial. Assim como o software QGIS, o modelo UMEP é uma ferramenta de código-fonte aberto, que permite seu uso sem restrições relacionadas a custos, licenças ou questões de direitos. Uma descrição detalhada do modelo será apresentada na seção 3.2.

### 3. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

#### 3.1. Aplicação do modelo WRF no estudo de Ondas de Calor

O estudo da resposta térmica de um ambiente urbano frente a eventos climáticos extremos, entre eles as Ondas de Calor, pode empregar diferentes e complementares abordagens metodológicas da climatologia urbana. Segundo Oke et al. (2017), os principais métodos utilizados são as observações em campo (aplicação de sensores para coleta de dados de parâmetros meteorológicos), a modelagem física (representação física em escala da superfície urbana) e a modelagem numérica (uso de equações matemáticas para simulação de processos atmosféricos e de superfície).

Para estudos que buscam a análise das interações dos processos climáticos em escala regional ou local (cidade), a modelagem numérica se mostra um método mais viável do que medições em campo e modelos físicos, já que pode representar o comportamento de fenômenos ao longo de todo o território, em diferentes resoluções espaciais e temporais.

Segundo Kumar et al. (2021), dentre os modelos numéricos de mesoescala mais utilizados para a análise de OC destaca-se o *Weather Research and Forecasting* (WRF). É um sistema de modelagem atmosférico integrado, desenvolvido tanto para a previsão numérica do tempo quanto para a pesquisa de fenômenos climáticos de mesoescala (SKAMAROCK et al., 2021). O modelo permite a simulação do comportamento da atmosfera em diferentes escalas de tempo e espaço, uma informação fundamental na compreensão das causas, impactos e dinâmica das OC. No Capítulo 3 serão apresentadas mais informações deste modelo quanto à estrutura de processamento e aos parâmetros de configuração.

Devido à ampla gama de aplicações do WRF em estudos ambientais (POWERS et al., 2017), é possível avaliar as OC segundo diferentes objetivos, que podem estar relacionados ao evento propriamente dito ou aos seus impactos direto e indiretos sobre determinado objeto de estudo. Dentre os vários objetivos, podem ser citados: a simulação de OC em alta resolução espacial (HUA et al., 2021), a análise de fatores atmosféricos e urbanos que impulsionam as OC (HIRSCH e KING, 2020), a resposta térmica da superfície em diferentes períodos de OC (PATEL et al., 2022), a projeção de cenários climáticos (RAGHAVENDRA et al., 2019), a sensibilidade do modelo segundo diferentes parâmetros físicos (IMRAN et al., 2018; DILAWAR et al., 2021),

os efeitos sinérgicos com Ilhas de Calor Urbano (LI e BOU-ZEID, 2013; RAMAMURTHY, BOU-ZEID, 2017) e estudos de conforto térmico humano (GIANNAROS et al., 2023; OBE et al., 2024; DING et al., 2024).

No que diz respeito ao impacto destes eventos extremos de calor na resposta térmica do ambiente urbano, alguns autores buscaram compreender como uma OC poderia relacionar-se sinergicamente com uma Ilha de Calor Urbana. O estudo seminal Li e Bou-Zeid (2013) avaliou a relação entre os dois na cidade de Baltimore, Estados Unidos. Com os dados espacializados da temperatura do ar a 2 m ( $T_2$ ) pelo modelo WRF, foi possível avaliar o comportamento da UHI em duas áreas da cidade ao longo de dez dias. Os resultados demonstraram que, durante a OC, os valores de  $T_2$  foram superiores nas duas áreas nos períodos pré-OC e pós-OC, indicando uma relação sinérgica entre a OC e a UHI. Quanto às diferenças de  $T_2$  entre a área urbana e rural ( $\Delta T_2$ ), os resultados demonstraram que as maiores diferenças ocorreram em período pós-OC. Os autores atribuem esta maior diferença neste período a maior capacidade de armazenamento de calor dos ambientes urbanos e a menor capacidade de resfriamento.

Simulações do WRF quanto a temperatura do ar, temperatura de superfície, umidade do ar e velocidade do vento foram utilizadas por Ramamurthy e Bou-Zeid (2017) para quantificar as interações da UHI de Nova York com um episódio de OC. As simulações foram validadas com dados de sensoriamento remoto e medições em campo e obtiveram uma satisfatória representação dos parâmetros meteorológicos. Os autores concluíram que durante a OC, o valor médio de  $\Delta T_2$  da UHI aumentou 1.5 K e que maior parte deste aumento aconteceu no período do meio da tarde. A disponibilidade de umidade e o armazenamento de calor foram cruciais no controle da UHI em Nova York. Devido a baixa velocidade dos ventos no período das OC, a ventilação intraurbana apresentou um efeito secundário no controle da UHI.

A utilização de esquemas de parametrização física que buscam representar os processos atmosféricos das áreas urbanas no WRF, conhecidas por parametrizações da camada limite urbana (*Urban Canopy Parameterizations*, UCP em inglês), permitiram a melhoria da reprodução dos processos atmosféricos nas cidades em diversas pesquisas (ZONATO et al., 2020). Desse modo, alguns estudos têm utilizado os dados de saída do modelo, como dados de entrada em modelos de microescala

para estudos de conforto térmico humano, em um processo chamado de multiescala (DU et al., 2022).

Giannaros et al. (2023) utilizaram o modelo WRF acoplado de forma on-line com os esquemas urbanos *Building Environment Parameterization* (BEP, MARTILLI et al., 2002) e *Building Energy Model* (BEM, SALAMANCA, MARTILLI, 2010) e de forma off-line com o modelo microclimático Rayman Pro (MATZARAKIS et al., 2007), para analisar a distribuição espaço-temporal de condições meteorológicas e biometeorológicas humanas em uma resolução espacial de 400 m, sobre a área urbana de Atenas, Grécia. Os autores concluíram que o período do estudo foi caracterizado por um alto desconforto térmico humano diurno, representado por um valor de PET modificado acima de 35°C. A partir dos dados meteorológicos espacializados do WRF, os autores identificaram que os habitantes da região sul da área urbana de Atenas enfrentaram níveis de desconforto térmico mais elevados em comparação às demais regiões.

Estudo similar foi desenvolvido por Obe et al. (2024) para a cidade de Lagos, Nigéria. Os autores avaliaram o estresse térmico da população em um período de Onda de Calor, com base nos dados do modelo WRF-BEP e o cálculo do índice de conforto térmico HUMIDEX, que indica o efeito combinado da temperatura e da umidade no conforto do corpo humano. Os resultados demonstraram haver uma influência da morfologia urbana com o padrão de estresse térmico, particularmente a noite devido aos efeitos combinados do armazenamento de calor urbano e alta umidade relativa. Durante o dia, áreas informais foram as mais afetadas pelas OC, com condições de estresse térmico elevado, e áreas centrais apresentaram um reduzido estresse térmico, que os autores associaram aos efeitos combinados do sombreamento dos edifícios altos e a advecção de ar frio oriundas de regiões de entorno.

Apesar da análise do conforto térmico realizadas por Giannaros et al. (2023) e Obe et al. (2024) se utilizarem de esquemas de parametrização avançadas, cabe ressaltar que os esquemas urbanos BEP e BEM generalizam as características urbanas (no que diz respeito a geometria, dimensão e orientação das edificações) e não empregam informações da vegetação urbana (localização e dimensões das árvores).

Para solucionar esta questão, Ding et al. (2024) propuseram uma estrutura de modelagem composta pelo modelo WRF-BEP e pelo modelo microclimático SOLWEIG, para estimar o conforto térmico da área central de Guangzhou, China, com

base no índice de conforto térmico *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) (BRODE et al., 2009). O modelo SOLWEIG estima os valores de temperatura radiante média (TRM) a partir de dados espacializados em microescala dos edifícios e vegetação e do tipo de cobertura do solo. Desse modo, os dados de saída do modelo WRF-BEP foram empregados no cálculo da TRM em alta resolução espacial (10 m) para determinar a variação espacial e temporal do UTCI da área de estudo. Os resultados revelaram que, durante o dia, as superfícies impermeáveis e a vegetação foram os fatores que mais impactaram o UTCI. Por fim, os autores concluíram que o conforto térmico foi dominado, principalmente, pela temperatura radiante média.

Com relação à utilização dos esquemas de parametrização urbanos do WRF (BEP e BEM), não há evidências definitivas de que esses esquemas melhoram substancialmente a representação dos processos atmosféricos urbanos (CARVALHO, 2019). Além disso, a utilização desses modelos requer um alto desempenho computacional, o que pode inviabilizar a aplicação do WRF em pesquisas com limitações de recursos.

No Brasil, o WRF é utilizado em inúmeras pesquisas ambientais com grande aplicação em temas relacionados à qualidade do ar atmosférico (ALBUQUERQUE et al., 2018), às condições de vento (TAVARES et al., 2022) e à sensibilidade do modelo segundo diferentes parametrizações (KITAGAWA et al., 2019; PEDRUZZI et al., 2022). Contudo, poucos estudos focaram na modelagem e interpretação de Ondas de Calor no Brasil (LIBONATI et al., 2022), especialmente voltados a climatologia urbana e biometeorologia humana. Destes, pode ser citado o trabalho de Moraes (2023) que avaliou o impacto das Ondas de Calor e Frio na taxa de mortalidade da cidade de São Paulo. A autora utilizou o modelo WRF para estimar a temperatura do ar a 2 m (T2) e, assim, quantificar a intensidade da UHI em um período de Onda de Calor. Com estes dados, estimou-se o impacto da T2 na saúde a partir de um modelo epidemiológico. Os resultados demonstraram que todos os óbitos relacionados ao calor eram atribuídos à intensidade da Onda de Calor.

No que diz respeito a análise do conforto térmico na escala intraurbana com a aplicação do modelo WRF, não foram encontrados trabalhos no Brasil que tratem deste tema até o momento de apresentação desta tese.

### 3.2. Mapeamento do índice PET (°C) em escala de cidade

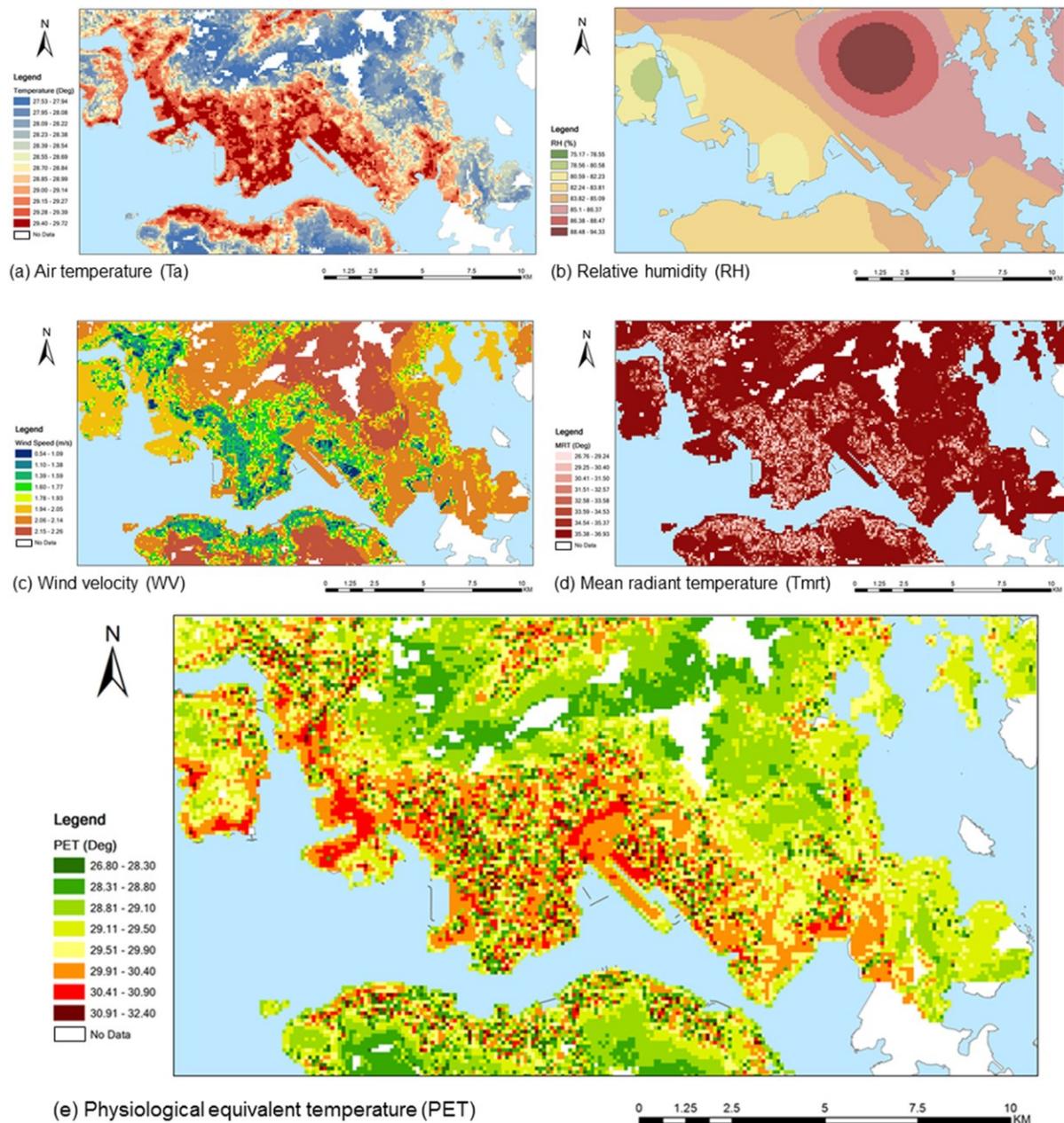
Com a possibilidade de se estimar a sensação térmica humana por modelos numéricos microclimáticos, diversas pesquisas passaram a mapear os resultados dos índices de conforto térmico em pequenas frações de áreas urbanas (YANG et al., 2020). A área destas frações urbanas foram reflexo da disponibilidade dos dados ambientais e da capacidade de processamento dos modelos. No âmbito da escala da cidade, alguns estudos se propuseram a utilizar modelos estatísticos e numéricos para analisar a variabilidade do índice PET segundo os diferentes padrões de uso e ocupação do solo urbano, com o propósito de fornecer recomendações climáticas a arquitetos e urbanistas. Mesmo que em uma escala considerada ampla, estes estudos se utilizam de informações microclimáticas que é, segundo Katzschner e Müller (2008), a escala climática adequada à discussão de aspectos relacionados ao projeto de espaços abertos e ao conforto térmico.

Como exemplo, Ketterer e Matzarakis (2016) mapearam o PET em alta resolução espacial (10 m) na cidade Stuttgart, Alemanha, em duas campanhas conduzidas em veículos ao longo da cidade, realizadas no dia 03 de julho de 2014 às 14h e às 21:30h. Quanto à representação das características urbanas, os autores utilizaram dados de topografia (3 m de resolução) e uso e cobertura do solo (50 x 50 m). Com dados das edificações, os autores calcularam o Fator de Visão do Céu para toda a cidade, com resolução espacial de 3 m. Para o período da tarde, os resultados indicaram uma amplitude do índice de 30°C, enquanto para a noite, uma amplitude de 5°C. Apesar dos resultados, os autores consideram que as campanhas não conseguiram cobrir toda a extensão da cidade necessária para treinar a rede neural artificial. Além disso, dados de albedo dos materiais e fluxos não-radiantes (calor sensível e calor latente) não foram utilizados, o que impacta a estimativa da temperatura radiante média.

Em estudo similar, Lai et al. (2016) analisaram a distribuição espacial do índice PET em região administrativa de Hong Kong, a partir de dados meteorológicos coletados em 40 estações de monitoramento climáticos e imagens dos satélites ASTER. A partir das coordenadas geográficas de cada estação, os autores realizaram interpolação espacial para estimar os valores dos dados sobre todo o território. Os dados espaciais incluíam informações da geometria e dimensão das edificações, relevo, redes rodoviárias, linhas costeiras, entre outros. Como pode ser visto na Figura 10, os autores mapearam as informações das quatro variáveis climáticas mais importantes

para o conforto térmico e calcularam os valores de PET para cada área, em uma resolução de 100 x 100m, com o modelo Rayman (MATZARAKIS et al., 2007; 2010). Obteve-se uma correlação entre os valores do índice PET modelados com os medidos em campo de  $R^2 = 0,52$  (correlação moderada positiva). Os autores sugeriram que esta correlação poderia ser elevada caso não houvesse certa deficiência na estimativa da temperatura do ar (considerando que as imagens de satélite não estiveram livres de nuvens), na temperatura radiante média (decorrente da moderada correlação com o FVC) e a umidade relativa (a baixa cobertura de estações em algumas regiões).

Figura 10 - Mapas das variáveis climáticas e do PET obtidas por LAI et al., 2016.



Fiorillo et al. (2023) empregou uma combinação de imagens de satélites, de medições em campo e de simulações no modelo ENVI-Met, para estimar a variabilidade espacial do índice PET em um episódio de onda de calor para toda a cidade de Prato, Itália. A partir das imagens de satélites (produto ECOSTRESS) e de escaneamento a laser (LIDAR), foram estimadas a temperatura de superfície, o fator de visão de céu e a fração de áreas verdes de toda a superfície do município. Com o ENVI-Met, os autores estimaram o PET de quatro áreas representativas da cidade. Adicionalmente, foi empregado o índice hUHTI (índice urbano de ondas de calor horário), que serviu de referência para a espacialização do PET sobre a cidade. Para o horário da tarde (13:00h), os resultados do mapa mostraram uma variação entre 44°C e 56°C. Ressalta-se que apenas uma estação meteorológica foi utilizada neste estudo, o que dificultou o estabelecimento das relações entre a temperatura do ar e os parâmetros urbanos.

Apesar dos métodos promissores utilizados nas pesquisas citadas, Çağlak (2024) ressalta que mapas bioclimáticos produzidos por métodos de interpolação (IDW, Krigagem, Função de base radial, entre outras) consideram valores médios das variáveis climáticas para áreas entre as estações meteorológicas, independentemente das condições de relevo e tipo de solo. Desse modo, estes métodos podem enviesar os resultados do PET de grandes áreas por não considerar suas características microclimáticas. Além disso, estes estudos acabam por enfrentar alguns desafios comuns em estudos do clima urbano, a saber: a inexistência de uma rede de estações meteorológicas apropriada que colete dados em áreas representativas da cidade, a ausência de dados espaciais em alta resolução espacial que representam aspectos intraurbanos da cidade e a alta demanda computacional exigida para a simulação dos parâmetros bioclimáticos (OKE et al., 2017). Especialmente no caso do uso do ENVI-Met, ainda há a exigência do pagamento de licenças para a utilização de todo o potencial do modelo, que pode inviabilizar pesquisas com poucos recursos.

Neste contexto, métodos que se utilizam de modelagem multiescala (mesoclimática e microclimática), com o uso de modelos de código aberto e livre de licenças, pode ser um interessante caminho no uso de análises de sensação térmica humana, neste caso com a aplicação do índice PET, para cidades que dispõem de poucas estações meteorológicas e escassos recursos humanos e financeiros.

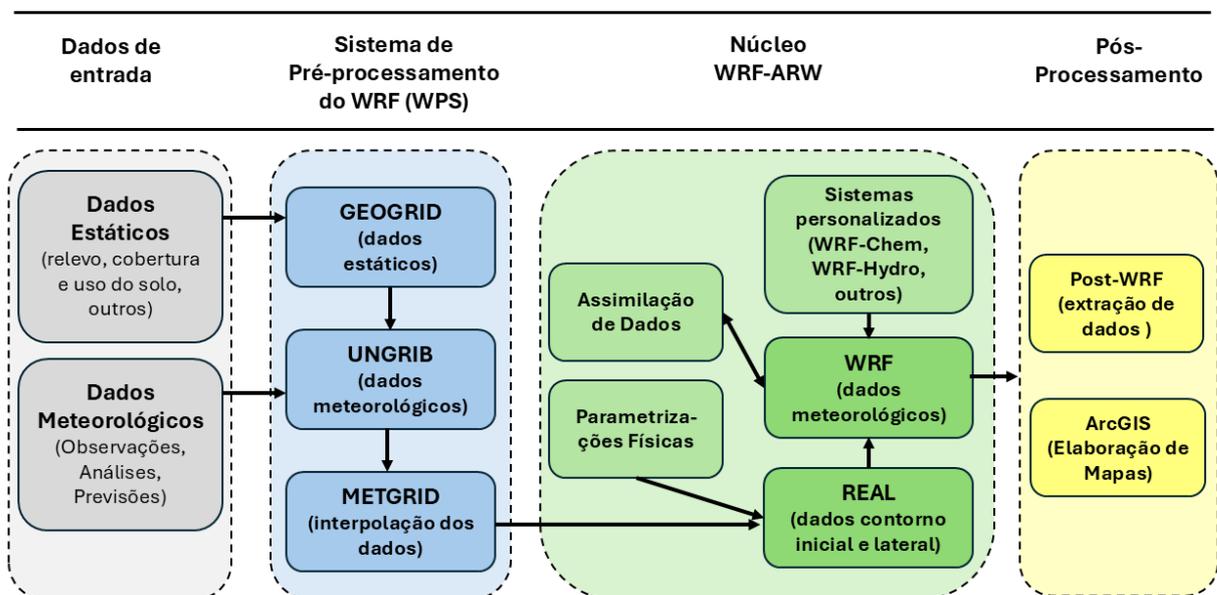
## 4. DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

### 4.1. Modelo atmosférico de mesoescala WRF

O WRF é um sistema de modelagem atmosférica integrado, projetado tanto para previsão numérica do tempo quanto para pesquisa de fenômenos climáticos de mesoescala (SKAMAROCK et al., 2021). Seu desenvolvimento teve início em meados de 1990 pela cooperação de instituições e agências governamentais americanas, como o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), o *National Oceanic and Atmospheric Administration*, o *United States Air Force*, o *Naval Research Laboratory*, a Universidade de Oklahoma, entre outras.

Este modelo foi desenvolvido em um código portátil e flexível, eficiente em processamento paralelo, por meio de software livre e de domínio público, tornando-se um “*community model*”. O WRF apresenta dois núcleos dinâmicos: o *Non-Hydrostatic Mesoscale Model* (NMM) desenvolvido pelo NCEP, e o *Advanced Research WRF* (ARW) desenvolvido pelo NCAR (POWERS et al., 2017). Cada núcleo corresponde a um conjunto de soluções dinâmicas que operam com projeções geográficas, aninhamento de grades e sistema de coordenadas verticais particulares, onde ambos ainda dispõem das mais variadas parametrizações para os principais processos físicos da atmosfera (ALBUQUERQUE et al., 2018). Na Figura 11 é apresentada a estrutura do modelo WRF-ARW.

Figura 11 - Estrutura do Modelo WRF-ARW



Assim como outros modelos numéricos atmosféricos regionais, o WRF utiliza informações das condições iniciais atmosféricas e de contorno de modelos numéricos globais, entre eles o modelo GFS (*Global Forecast System*) do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). Dessa forma, as condições iniciais e de contorno para casos de dados reais são pré-processadas por meio de um pacote separado chamado Sistema de Pré-processamento WRF (*WRF Preprocessing System*, WPS em inglês). Este é formado pelos componentes GEOGRID, UNGRIB e METGRID.

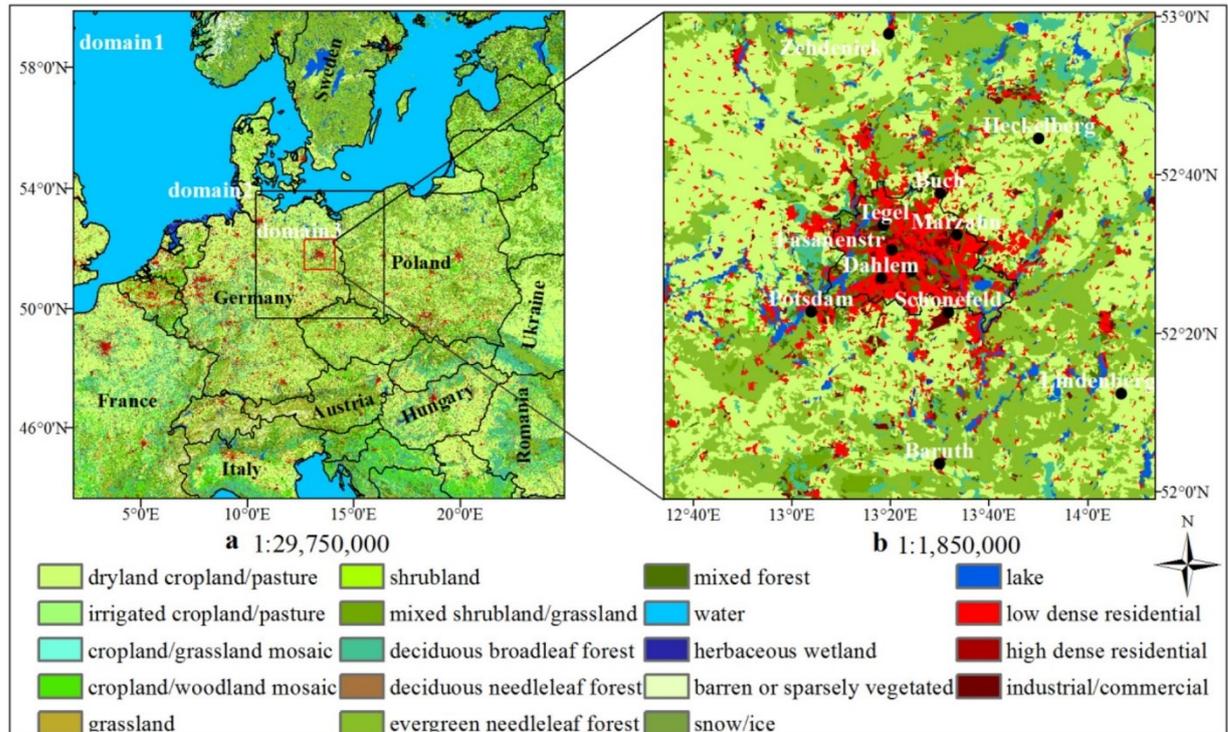
Segundo Skamarock et al. (2021), os dados físico geográficos da área de estudo, incluindo o tipo de projeção, localização no globo, número de pontos de grade, locais de aninhamento e distâncias de grade, são definidos pelo programa GEOGRID em um recorte espacial conhecido por domínio. Os dados meteorológicos de entrada do modelo, geralmente em formato GRIB, são posteriormente gravados em formato de arquivo intermediário pelo componente UNGRIB. Por fim, o METGRID interpola horizontalmente os dados meteorológicos (intermediários) para os domínios definidos e cria arquivos de dados de entrada necessários à modelagem no núcleo WRF-ARW.

Os dados de saída do WPS são então passados para o núcleo ARW, que é formado por dois componentes. O primeiro, programa REAL, gera as condições de contorno iniciais e laterais a partir dos dados de entrada. Finalizado o processo, os dados de saída são então usados pelo programa WRF, propriamente dito. Para abordar a modelagem atmosférica em diferentes campos, o WRF também oferece sistemas personalizados para aplicações específicas, tais como: WRF-Chem (química atmosférica), WRF-Hydro (modelagem hidrológica), WRF-Fire (remodelagem de áreas selvagens) e WRF-Urban (modelagem de áreas urbanas) (POWERS et al., 2017).

O modelo WRF é capaz de focar em uma área específica de uma simulação por meio de opções de aninhamento de grade, ou seja, a resolução horizontal é aprimorada em uma região de interesse menor por introduzir uma grade adicional (ou grades) na simulação. Esta nova área (subdomínio) está completamente contida no domínio maior. Há também opções de refinamento vertical, onde um subdomínio pode ter uma estrutura vertical diferente do domínio maior. Os dados calculados nos domínios podem fluir em apenas um sentido (*one-way*), apenas do maior para o menor, ou em ambos (*two-way*), em que há um feedback entre as grades dos domínios. Na Figura

12 é mostrado um exemplo de aplicação da técnica de aninhamento de grade em região da Alemanha.

Figura 12 - Aninhamento de grade e uso e ocupação do solo



Fonte: Li et al. (2019)

Tal qual outros modelos climáticos regionais, o WRF apresenta opções de parametrizações das categorias físicas incorporadas, que são: i) microfísica, ii) cumulus, iii) camada limite planetária, iv) modelo de superfície de terra, v) radiação e vi) modelo de superfície urbana. Para cada categoria listada, existem esquemas desenvolvidos por pesquisadores que adaptaram a física do modelo a determinada especificidade de estudo.

O grande desafio enfrentado é escolher um grupo de parametrizações que seja o mais adequado ao foco da pesquisa, às condições da região a ser estudada, assim como aos recursos computacionais disponíveis (MOLLMANN et al., 2018). Vários estudos reforçaram, portanto, a importância de testes de conjuntos de esquemas para uma melhor performance do modelo WRF (JACONDINO et al., 2021; GOMES et al., 2022; DANTAS; SILVA FILHO; VIEIRA, 2022). Na Tabela 4 é apresentada uma breve descrição as parametrizações do WRF e o número de esquemas disponíveis no modelo para a versão 4.5.

Tabela 4 - Parametrizações disponíveis no modelo WRF (ARW), versão 4.5.

Parametrização	Descrição	Qt.
<b>Microphysics</b> ( <i>mp_physics</i> )	Tem o objetivo de descrever a formação, crescimento e sedimentação de partículas de água (hidrometeoros). Algumas parametrizações deste tipo empregam informações de transporte de aerossóis que agem como núcleo de condensação de nuvens para gotas de água.	20
<b>Cumulus</b> ( <i>cu_physics</i> )	Empregada para calcular a fração de nuvem em uma célula de grade, bem como a sobreposição de nuvens ao longo de uma coluna de grade, informação necessária nas parametrizações Microfísica e Radiação (SHIU et al, 2021).	14
<b>Surface Layer</b> ( <i>sf_sfclay_physics</i> )	Fluxos de superfície abordam interações que ocorrem entre a camada superficial atmosférica e o solo e, em alguns casos, diretamente com a parametrização Camada Limite Planetária (DUDHIA, 2021).	07
<b>Land Surface Model</b> ( <i>sf_surface_physics</i> )	Os modelos de superfície terrestre têm vários graus de sofisticação em lidar com fluxos de calor e de umidade em múltiplas camadas do solo e com efeitos de vegetação, raiz e copa e previsão de cobertura de neve na superfície.	15
<b>Planetary Boundary Layer</b> ( <i>bl_pbl_physics</i> )	Lidam com o crescimento da camada limite ao longo de seu ciclo diurno, além de representar os fluxos (calor, umidade e momento) da camada de superfície para a camada limite, por meio da difusão turbulenta, em uma única coluna até o topo do modelo (DUDHIA, 2021).	15
<b>Radiation</b> ( <i>ra_lw/sw_physics</i> )	Os processos envolvidos nesta parametrização incluem a interação da radiação com diferentes comprimentos de onda com a atmosfera e a superfície (ULRICH, 2020). Na atmosfera, a dispersão, a absorção e a reflexão de radiação são consideradas levando em conta valores previstos de temperatura, umidade, nuvens, aerossóis, vapor d'água e gases residuais. Na superfície, o albedo e a emissividade dos elementos constituintes controlam a probabilidade de reflexão e emissão de radiação.	09
<b>Urban Surface Options</b> ( <i>sf_urban_physics</i> )	O objetivo desta parametrização é melhor representar os processos físicos envolvidos na troca de calor, quantidade de movimento e vapor d'água no ambiente urbano. A depender do esquema escolhido, a superfície pode ser representada apenas como um plano ou até incluir edifícios e estradas, em que são adicionadas informações quanto a geometria da cidade e propriedades térmicas.	03

Fonte: Adaptado de Skamarock et al. (2021)

Ao final de todo o processo de modelagem atmosférica, o WRF fornece uma variedade de informações climáticas da região de estudo, que podem ser extraídas na forma de dados tabulados ou mapas temáticos, por pacotes gráficos de pós-processamento ou com o uso de sistemas de informações geográficas (SIG). Dentre estes, podem ser citados: o NCL, o ARWpost, o PostWRF, o VAPOR e o ArcGIS.

## 4.2. Preditor ambiental UMEP

O modelo numérico Preditor Ambiental Urbano de Multiescala (*Urban Multi-scale Environmental Predictor*, UMEP em inglês) é uma ferramenta integrada para aplicações de climatologia urbana e planejamento de cidades sensíveis ao clima, disponibilizada ao público no ano de 2018 e desenvolvida em parceria com diversos pesquisadores das ciências ambientais de vários países (LINDBERG et al., 2018). Destinada a pesquisadores, arquitetos, planejadores urbanos, climatologistas e meteorologistas, o UMEP está implementado como um módulo de extensão (plug-in) no software QGIS, um programa de sistema de informação geográfica (SIG), gratuito e de código aberto (QGIS Development Team, 2017).

A partir das facilidades de manipulação e análise de dados espaciais do QGIS e a combinação de modelos 1-D e 2-D de última geração, que permitem a inserção de dados de múltiplas fontes, formatos e variadas escalas temporais e espaciais, com o modelo UMEP é possível produzir dados, gráficos e mapas destinados a análise de conforto térmico exterior, consumo de energia urbano e mitigação de mudanças climáticas (LINDBERG et al., 2018). Como forma de incentivar o seu desenvolvimento, o modelo foi elaborado como uma ferramenta comunitária de código aberto, sem restrições relacionadas a custos, licenças ou direitos.

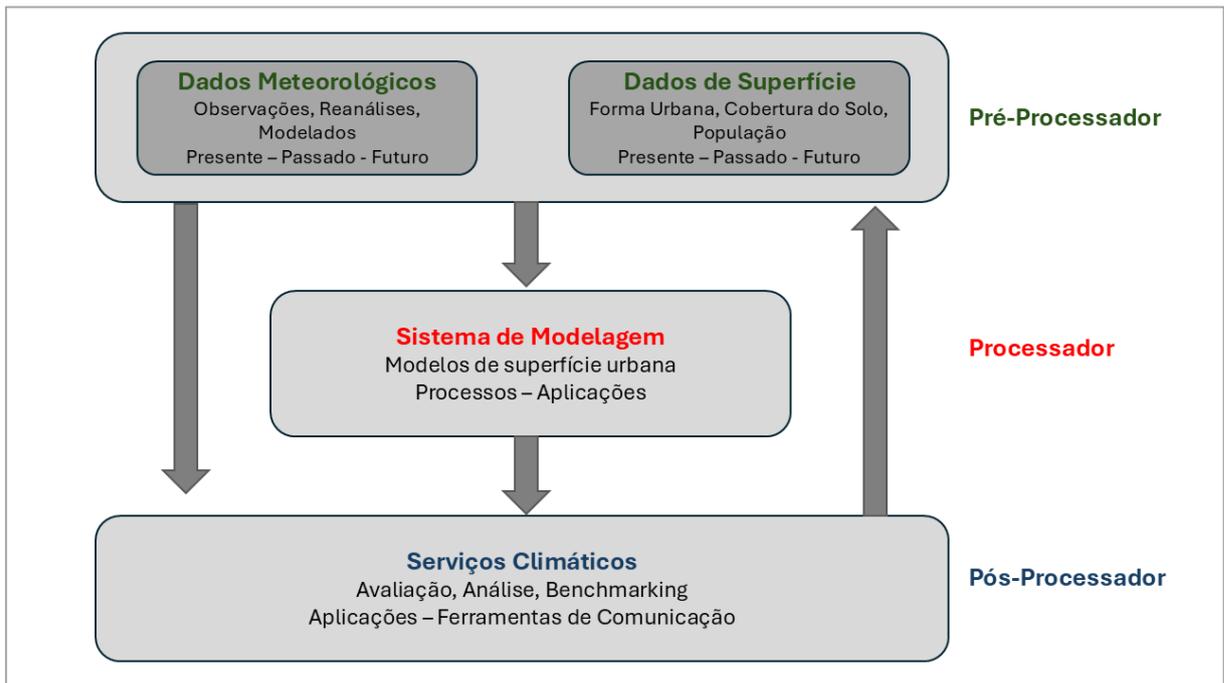
Ao longo desta seção, serão apresentadas de forma sintética a estrutura e funcionalidades do modelo UMEP, especialmente as utilizadas na elaboração desta pesquisa. Para mais informações, podem ser consultados o manual e os vídeos-tutoriais do modelo em Lindberg et al. (2019) e na página eletrônica [https://www.youtube.com/channel/UCTPkXncD3qhb5ZTdZe\\_u7gA](https://www.youtube.com/channel/UCTPkXncD3qhb5ZTdZe_u7gA), respectivamente.

A estrutura do UMEP é composta por três elementos principais: o pré-processador (utilizado para a entrada de informações meteorológicas e de superfície), o processador (conjunto de plug-ins onde se realizam as modelagens climáticas); e pós-processador (conjunto de ferramentas para análise dos resultados das modelagens). Na Figura 13 é apresentado de forma resumida a estrutura do modelo UMEP.

O componente **pré-processador** é composto por uma série de funções que auxiliam a preparação dos dados de entrada do modelo (passado - presente - futuro) e que são geralmente necessários em estudos que objetivam análises climáticas urbanas. Dentre as funcionalidades podem ser citados: o download de dados meteorológicos

de modelos climáticos globais (no caso da ausência de dados de campo), a elaboração de modelos digitais de superfície (com base em informações da topografia, das edificações e das árvores de uma região), a análise de geometria urbana (como o cálculo do Fator de Visão de Céu) e a classificação de cobertura do solo de áreas urbanas (como o classificador de tipos de superfície urbano).

Figura 13 - Estrutura do modelo UMEP segundo Lindberg et al., 2019.



Fonte: Adaptado de Lindberg et al., 2018.

O componente **processador** reúne um conjunto de módulos que permitem o cálculo e a modelagem de informações meteorológicas e climáticas urbanas. Para cada aplicação do modelo, um plug-in específico foi desenvolvido para determinada finalidade. Destes, podem ser citados: o ExtremeFinder, o SOLWEIG, o SEBE, o SUEWS e o URock.

Por fim, o componente **pós-processador** também agrupa um conjunto de plug-ins que se destinam a analisar os dados de saída produzidos no componente processador, entre eles o SOLWEIG Analyzer, o SUEWS Analyzer e o URock Analyzer. Além destes, há o plug-in SpatialTC (*Spatial Thermal Comfort*) que produz mapas de índices de conforto térmico com base nos dados de saída dos plug-ins SOLWEIG e URock.

Cabe ressaltar que desde o seu lançamento, o modelo UMEP vem sendo constantemente atualizado pela comunidade científica e por seus usuários para

aprimorar os recursos de modelagem. Como exemplo, o módulo URock foi o último plug-in adicionado ao modelo UMEP e não consta na descrição elaborada por Lindberg et al. (2018), apenas em seus tutoriais.

A seguir, serão descritos os módulos SOLWEIG, URock e SpatialTC em maiores detalhes, dado que foram os utilizados para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa. Todos os três módulos produzem arquivos em formatos raster com resolução espacial de até 1 m por pixel.

#### a. O módulo SOLWEIG

O módulo SOLWEIG (*SOLar and LongWave Environmental Irradiance Geometry*) foi desenvolvido para calcular a temperatura radiante média (TRM) de espaços externos, que é um dos principais parâmetros que influenciam o conforto térmico humano (LINDBERG et al., 2008, 2018). Para estimar a TRM, o SOLWEIG considera os fluxos de radiação de ondas curtas e longas em seis direções calculados individualmente e utiliza informações espaciais da geometria e superfície urbana e dados meteorológicos, que determinam os fluxos radiantes.

Os dados da geometria urbana são compostos por dados tridimensionais do terreno, das edificações e das árvores. Após o tratamento destes dados no QGIS, realiza-se no componente Processador do UMEP a construção do modelo digital de superfície (MDS). Com o MDS, estima-se o sombreamento provocado pelos edifícios e árvores, para a hora da análise, e o do Fator de Visão de Céu (FVC) da área de estudo. O sombreamento é responsável pela obstrução da entrada de radiação solar nos espaços abertos, o que influencia os valores de TRM. O FVC é a razão entre a radiação recebida (ou emitida) por uma superfície plana e a radiação emitida (ou recebida) por todo o ambiente hemisférico (OKE et al., 2017). Esta métrica adimensional é uma importante variável para o conforto térmico (MIDDEL et al., 2017).

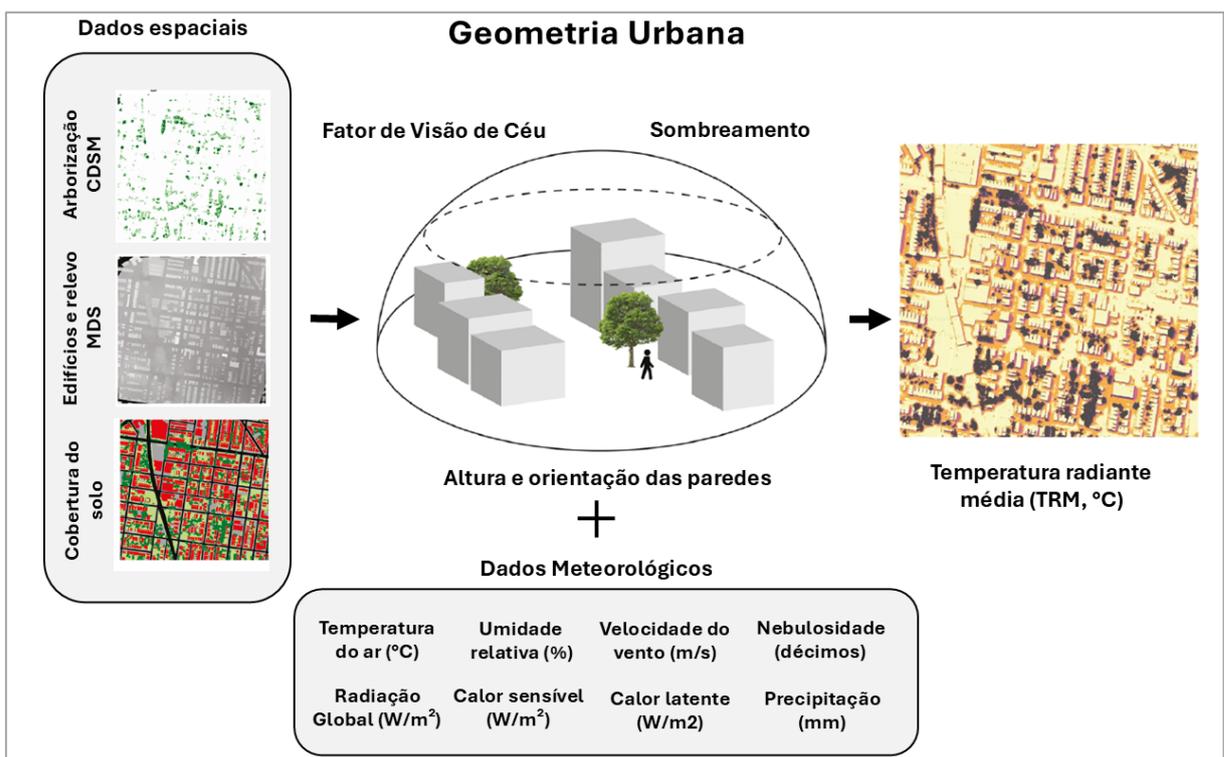
Para estimar os fluxos de radiação refletidos (albedo) e emitidos (emissividade) pela superfície, são empregados dados espaciais de cobertura do solo. O SOLWEIG permite a classificação do solo em seis classes, a saber: pavimento, edifícios, árvores, grama, solo exposto e água. Desse modo, conforme as características térmicas de cada classe do solo, o módulo SOLWEIG estima os fluxos radiantes da superfície. Um outro fator que influencia o acesso solar e os fluxos radiativos no meio urbano é a orientação e a altura das edificações. Assim, com base nos dados espaciais das

edificações, o UMEP utiliza as informações da orientação e altura de cada fachada dos edifícios que compõem a área analisada para estimar as TRM.

Por fim, o SOLWEIG requer informações meteorológicas do lugar que são utilizadas nos cálculos da TRM. Entre elas estão: a temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), a umidade relativa do ar (%), a velocidade (m/s) e direção (graus) dos ventos, a precipitação (mm), a pressão barométrica (kPa), fração de nuvens (décimos), o saldo de radiação ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), a radiação global ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), o fluxo de calor antropogênico ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), o fluxo de calor sensível ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e o fluxo de calor latente ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Ao final de todo o processo, o SOLWEIG pode produzir mapas de TRM em alta resolução espacial para uma hora específica ou para uma série temporal. Na Figura 14 é apresentado um esquema simplificado das informações necessárias pelo SOLWEIG para o cálculo da TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Figura 14 - Esquema simplificado do cálculo da TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) pelo módulo SOLWEIG.



Fonte: Adaptado de Li, 2021.

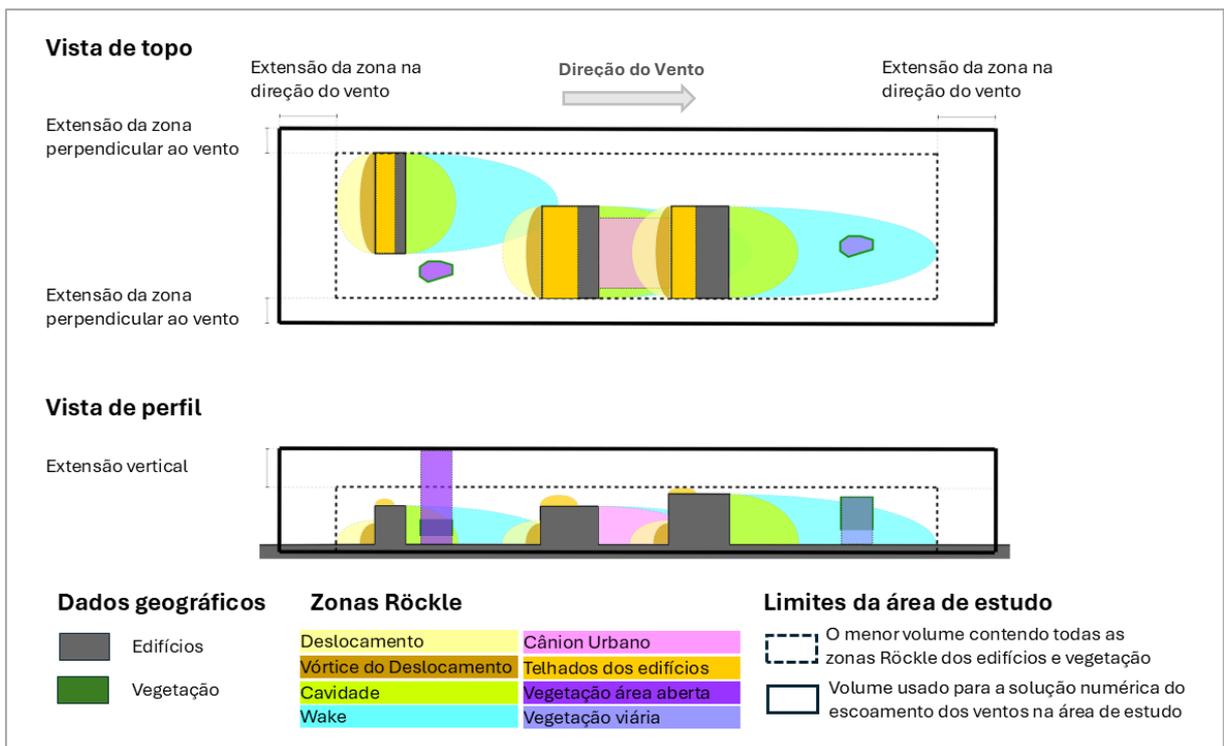
#### b. O módulo URock

O URock é um modelo de diagnóstico de código aberto dedicado ao cálculo dos escoamentos da ventilação intraurbana, fundamentado em leis empíricas extraídas de experimentos em túneis de vento (BERNARD et al., 2023). Para tanto, se utiliza de

dados de vento (velocidade e direção resultante) a uma determinada altura do solo e informações tridimensionais da área de estudo (geometria e dimensões de edifícios e vegetação). O cálculo para estimar as características do vento passa por duas etapas principais: a inicialização do campo eólico e o equilíbrio do campo eólico.

De acordo com Bernard et al. (2023), inicializa-se o campo eólico com base nas leis empíricas e em zonas de fluxo turbulentas do vento, chamadas zonas Röckle. O URock considera nove zonas diferentes identificadas ao redor dos edifícios e dentro da vegetação, a saber: i) seis zonas no entorno de edifícios isolados; ii) uma zona única entre dois edifícios adjacentes (cânion urbano) e iii) duas zonas distintas dentro da vegetação que dependem de sua proximidade com edifícios. Na Figura 15 são demonstradas oito zonas utilizadas pelo URock, com seus respectivos nomes, para inicialização do campo eólico.

Figura 15 - Oito zonas utilizadas pelo URock para inicialização do campo eólico.



Fonte: Adaptado de Bernard et al., 2023.

O tamanho de cada zona é baseado nas dimensões das construções (altura, comprimento e largura) e na capacidade de atenuação da vegetação. Dessa forma, a velocidade e direção do vento são calculadas segundo o tipo de zona e a localização dentro da zona (distância em relação à parede dos edifícios, ao solo ou ao final da zona).

Uma vez inicializado o campo eólico, este é balanceado para torná-lo fisicamente relevante, com o propósito de reduzir as diferenças com o campo de vento inicial. Nesta etapa, o algoritmo empregado no URock segue quatro procedimentos:

1. **Criação das geometrias do URock** – transformação das geometrias de entrada em formato adequado a inicialização da velocidade do vento e a criação da grade para resolução numérica;
2. **Efeito de todos os obstáculos no vento** – cálculo da altura de rugosidade superficial ( $z_0$ ) e o comprimento de deslocamento ( $d$ ) como valores únicos para toda a área de estudo. Estas duas métricas referem-se à rugosidade aerodinâmica da superfície frente ao escoamento dos ventos na malha urbana e são necessárias à estimativa do perfil vertical do vento;
3. **Efeito individuais dos obstáculos no vento** – identifica-se os limites das zonas Röckle dos edifícios e da vegetação e calculados o fator de vento correspondente a cada zona, tomando em conta possíveis sobreposição das zonas. O fator de vento é definido como a fração da velocidade do vento a uma dada altura e posição na zona.
4. **Cálculo da velocidade do vento** – os componentes tridimensionais do vento são inicializados em cada célula de grade do domínio e então usados no modelo numérico para obter a velocidade final balanceada dos fluxos do vento.

Ao final de todo o processo, o modelo URock pode produzir mapas da velocidade do vento em formato raster e mapas de direção dos ventos em formato vetorial. Estes mapas podem ainda ser elaborados a partir de diferentes alturas em relação ao nível do solo, definidos pelo usuário do modelo.

#### c. Módulo SpatialTC

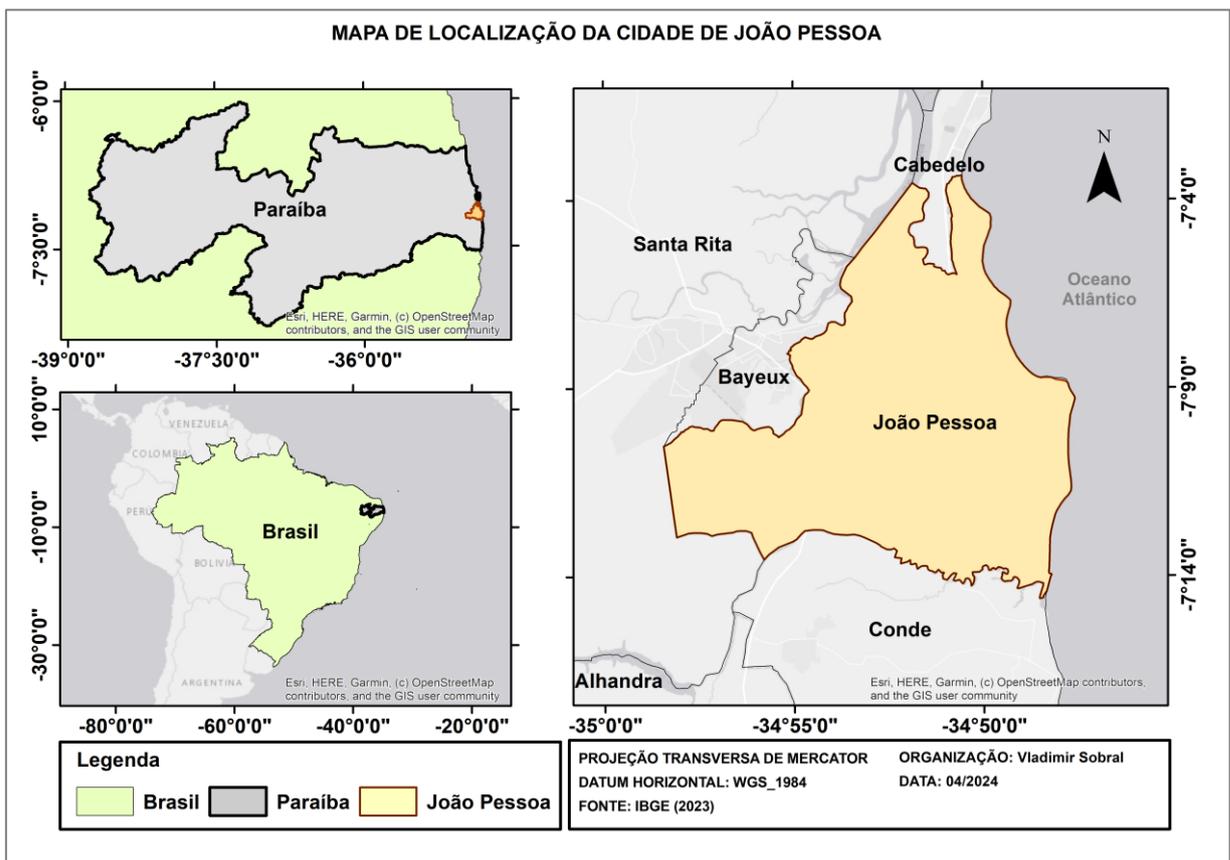
O módulo SpatiaTC permite a criação de mapas da variação espacial de índices de conforto térmico, a partir dos dados de saída dos plug-ins SOLWEIG (dados de temperatura radiante média) e URock (dados de velocidade do vento). Os índices de conforto térmico suportados pelo plug-in são o PET ( $^{\circ}\text{C}$ ), o UTCI ( $^{\circ}\text{C}$ ) e o COMFA ( $^{\circ}\text{C}$ ). Além dos dados de TRM e velocidade do vento, o SpatialTC requer informações de parâmetros humanos necessários aos cálculos dos índices de conforto térmico, entre eles: idade, sexo, estatura (m), peso (Kg), atividade metabólica (W) e vestimenta (clo).

## 5. UNIVERSO DE ANÁLISE

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA CIDADE DE JOÃO PESSOA

Fundada em 5 de agosto de 1585, a cidade de João Pessoa está localizada na zona costeira do estado da Paraíba, Brasil, entre as coordenadas geográficas 7°00'00" e 07°07'30" de latitude sul e 34°52'30" e 34° 45'00" de longitude oeste (Figura 16). Conta com uma área aproximada de 210,45km<sup>2</sup> e limita-se ao norte com o município de Cabedelo; a leste com o Oceano Atlântico; a oeste com os municípios de Bayeux e Santa Rita; e ao sul com o município do Conde. A partir da Lei Complementar Nº 59/2003, o município compõe a Região Metropolitana de João Pessoa (RMJP) com outras 11 cidades.

Figura 16 - Mapa de localização da cidade de João Pessoa



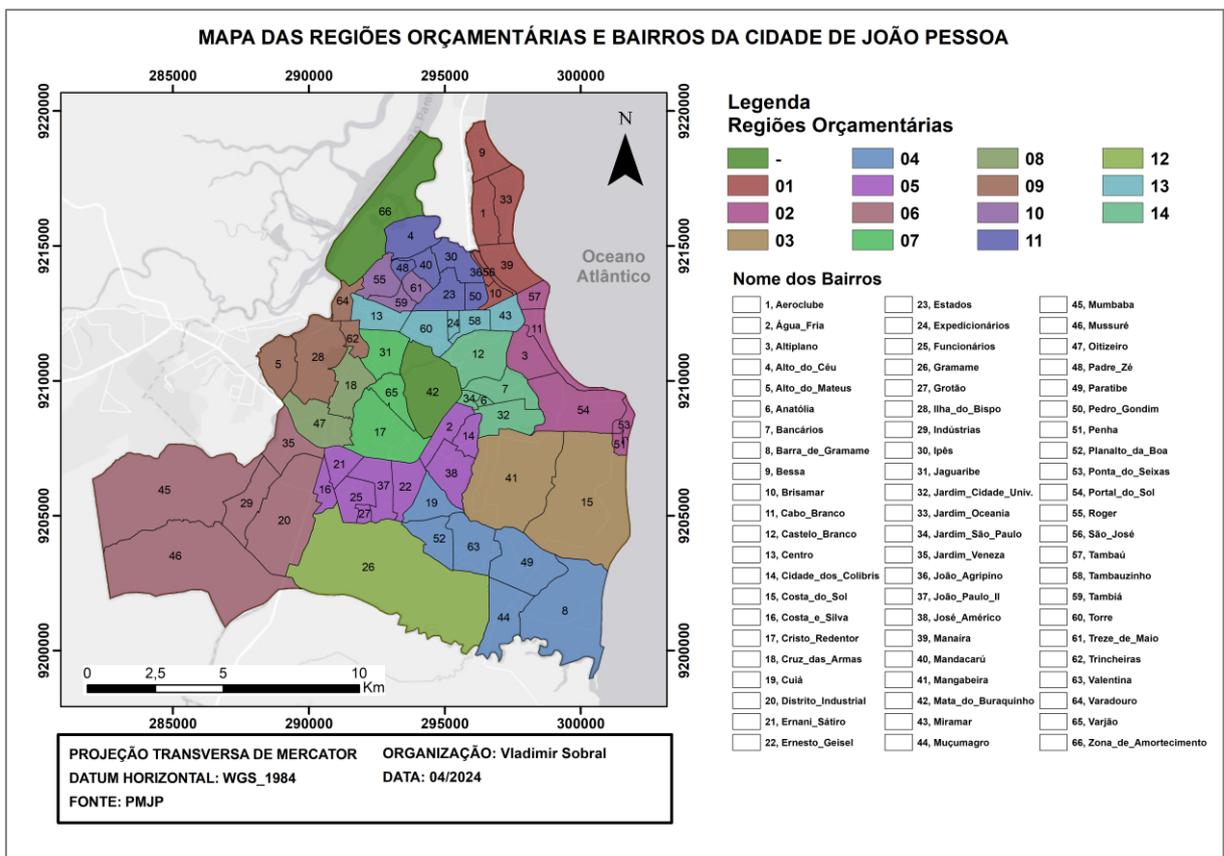
Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo o censo de 2022 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a cidade de João Pessoa tem população estimada de 833.932 habitantes e uma densidade demográfica de 3.970,27 hab/km<sup>2</sup> (IBGE, 2023). Estes números mostram que o contingente populacional pessoense cresceu 15,26% desde o último

censo, realizado no ano de 2010, e que representa um crescimento bem superior ao da média das cidades brasileiras que foi de 6,34%.

Em relação ao arranjo espacial da população, os munícipes estão distribuídos em 64 bairros legalmente delimitados, agrupados em 14 Regiões Orçamentárias ou de Participação Popular (Figura 17). No que diz respeito à tipologia intraurbana, segundo o IBGE (2017), a cidade conta com uma forma de concentração litorânea e zonal, em que grande parte da população reside em áreas de baixas condições de vida (tipo G e H). De uma forma geral, áreas com boas condições de vida (tipo C) são encontradas no litoral (região leste), destacando-se bairros como Cabo Branco, Manaíra e Bessa. As áreas consideradas antigas e tradicionais da cidade preservam também boas condições de vida (tipo D), a exemplo dos Bairros de Estados, Expedicionários e Bancários. Medianas condições de vida registram-se em áreas entremeadas no tecido urbano (tipo E e F), como nos bairros Mangabeira e Varjão, e regiões classificadas como baixas condições de vida (tipo G) estão no entorno das áreas com boas condições de vida, a exemplo dos bairros Costa e Silva ou Cruz das Armas.

Figura 17 - Mapa das regiões orçamentárias e bairros da cidade de João Pessoa



Fonte: Elaborado pelo autor

A ocupação da cidade iniciou-se a partir do bairro Centro, localizada às margens do rio Sanhauá, de onde grande parte da população, posteriormente, migrou em direção aos bairros próximos ao mar, causando um movimento de ocupação e expansão dessas áreas (OLIVEIRA, 2006). Segundo Andrade (2017), o início da verticalização em João Pessoa também ocorreu no bairro Centro, com edificações de dez a dezoito pavimentos. Somente a partir do ano de 1979 a construção de altos edifícios concentrou-se nos bairros litorâneos, entre eles Manaíra, Tambaú e Cabo Branco. Estas construções sofreram a interferência da restrição de gabarito e escalonamento impostos às edificações na faixa dos primeiros 500 metros a partir da preamar de sizígia da orla marítima paraibana pelo art. 229 da Constituição Estadual de 1989, regulamentado pelo art. 25 do Plano Diretor de João Pessoa e em vigor até os dias atuais (PARÁIBA, 1989; JOÃO PESSOA, 2024).

Apesar de uma conquista urbana celebrada por muitos habitantes da cidade, o escalonamento não impediu a verticalização no interior dos bairros da orla marítima e nem garantiu o controle da densidade, impactando assim a paisagem e qualidade ambiental dos bairros (SILVA, 1999; DE ANDRADE, 2017). Nos últimos anos, a intensa pressão de grandes empresas construtoras e incorporadoras promoveu a elevação do gabarito médio dos prédios para mais de vinte pavimentos, alguns com mais de quarenta pavimentos, alçando João Pessoa a lista de cidades com edifícios mais altos do Brasil.

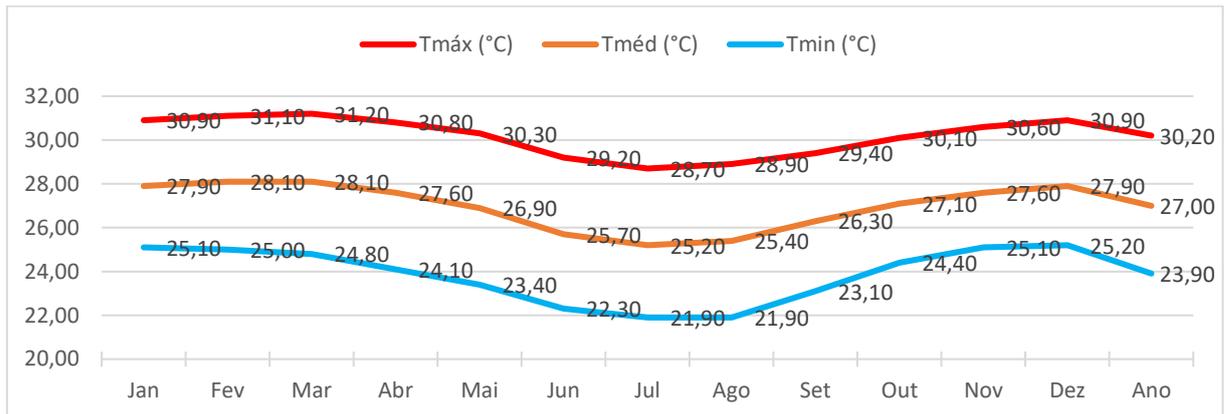
## **5.2. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN**

Segundo a classificação climática de Köppen (1901), a cidade de João Pessoa encontra-se na faixa climática As' (DUBREUIL et al., 2018). A faixa climática As', descrita como clima tropical (classe A) com estação seca no verão (s), é caracterizada por apresentar chuvas de outono-inverno, com média térmica anual em torno de 25°C, umidade relativa do ar média anual próxima a 80%, amplitude térmica anual em torno de 5°C, estação seca curta e variações pluviométricas entre 1500 e 1700mm. As características climáticas da cidade de João Pessoa são confirmadas pelos valores das Normais Climatológicas da série histórica de 1991-2020 do município, publicado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022).

De acordo com o INMET, as normais de temperatura do ar máxima, média e mínima apresentam um padrão elevado para todo o ano, característico de regiões de baixa latitude (Gráfico 1). O valor da temperatura compensada média anual da série

histórica é de 27,00° C, com os registros mais altos nos meses de fevereiro e março (28,10°C) e o mais baixo no mês de julho (25,2°C). A temperatura máxima do ar (°C) tem o seu valor máximo mensal médio registrado no mês de março (31,20°C) e a temperatura mínima do ar (°C) tem o seu valor mínimo mensal médio registrado nos meses de julho e agosto (21,90°C).

Gráfico 1 - Temperatura do ar máxima, média e mínima mensal e anual (°C)

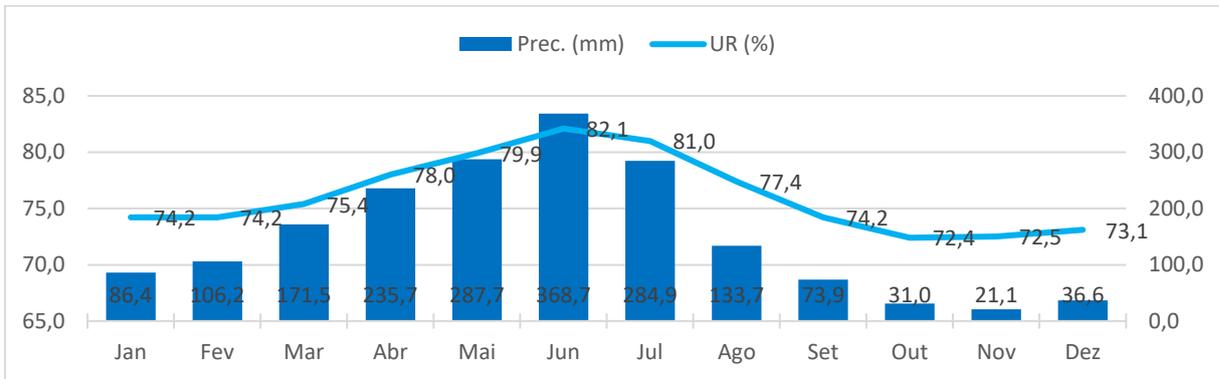


Fonte: INMET (2022)

No Gráfico 2 são apresentados os valores da umidade relativa do ar (%) compensada mensal e da precipitação acumulada (mm) mensal. É possível observar que os registros da UR (%) permanecem sempre elevados o ano todo (acima de 70%), decorrente da proximidade da cidade com o Oceano Atlântico, com uma normal anual de 76,2%. Os meses de outubro, novembro e dezembro apresentam os menores valores de UR (%), enquanto os meses de junho e julho apresentam valores acima de 80%. Quanto à precipitação mensal acumulada (mm), os três meses com maiores registros são: maio (287,7 mm), junho (368,7 mm) e julho (284,9 mm). De modo contrário, os três meses com menores valores de precipitação são outubro (31,00 mm), novembro (21,10 mm) e dezembro (36,60 mm). O total acumulado anual do município é de 1837,40 mm.

Quanto aos ventos de superfície, a confluência dos ventos alísios que atuam pelo litoral do Nordeste brasileiro, garante um regime de ventos predominantemente diário e intenso, com direção predominante do quadrante sudeste (SILVA, 1999). As variações sazonais dos ventos na cidade são influenciadas pelas mudanças no comportamento geral da circulação atmosférica.

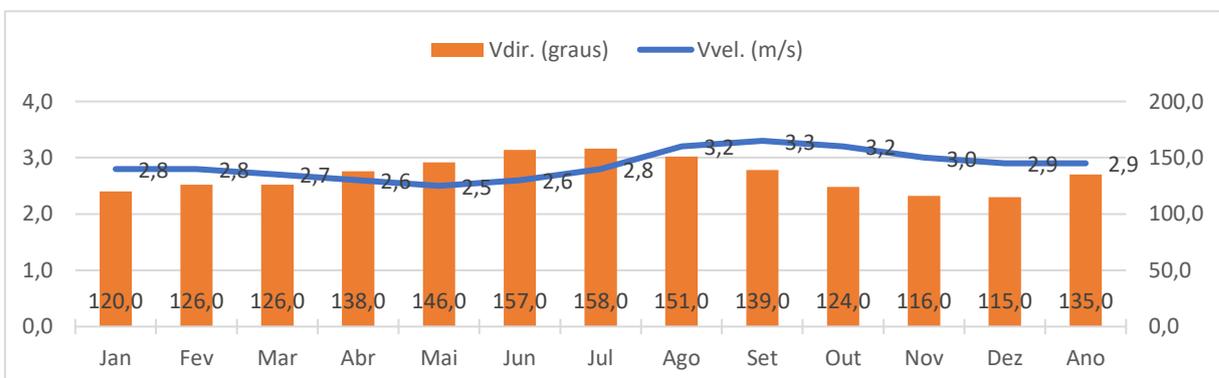
Gráfico 2 - Umidade relativa do ar (%) compensada e precipitação acumulada (mm) mensal.



Fonte: INMET (2022)

Dentre os sistemas atmosféricos que atuam no litoral mais oriental do Nordeste, podem ser citados a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a massa Tropical Atlântica (mTA), a perturbação Ondulatória no Campo dos Alísios (POA) e as frentes frias (DINIZ, OLIVEIRA, 2016). Nos meses de abril e maio há uma redução da velocidade dos ventos na região devido à proximidade com a ZCIT. Com o retorno da ZCIT para as latitudes mais equatoriais, e consequente aumento dos gradientes de pressão atmosférica, ocorre uma intensificação dos ventos que atinge seu ápice nos meses de agosto e setembro (SILVA, 1999). No Gráfico 3 são apresentadas as normais climatológicas do vento para a cidade de João Pessoa do período de 1991 - 2020 (INMET, 2022).

Gráfico 3 - Normais da Velocidade e direção resultante mensal e anual dos ventos

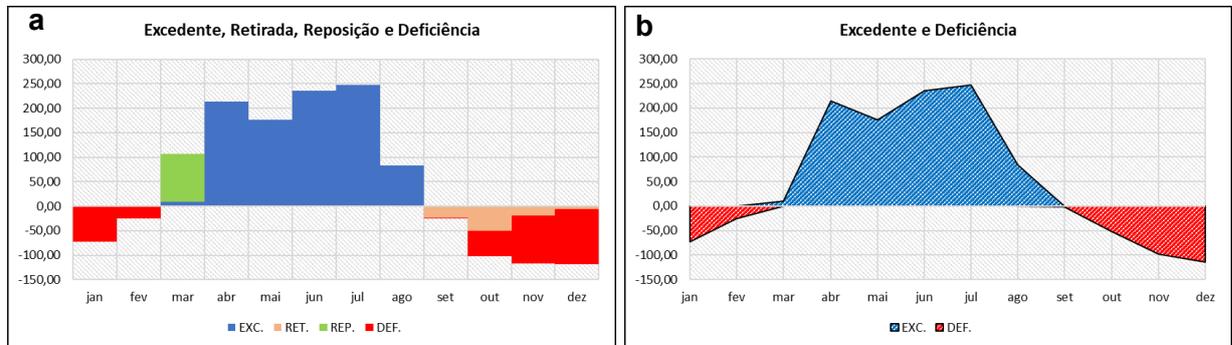


Fonte: INMET (2022)

No que diz respeito ao balanço hídrico climatológico (BHC) do município, determinado pelo autor desta pesquisa com base no método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), o resultado dos cálculos indicam uma considerável Deficiência Hídrica (DEF)

nos meses de outubro a fevereiro, com os meses de abril a agosto apresentando um Excedente Hídrico (EXC). O mês de março caracteriza-se por ser um mês de Reposição Hídrica (REP) para o BHC (Gráfico X).

Gráfico 4 - Excedente, retirada, reposição e deficiência hídrica da cidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

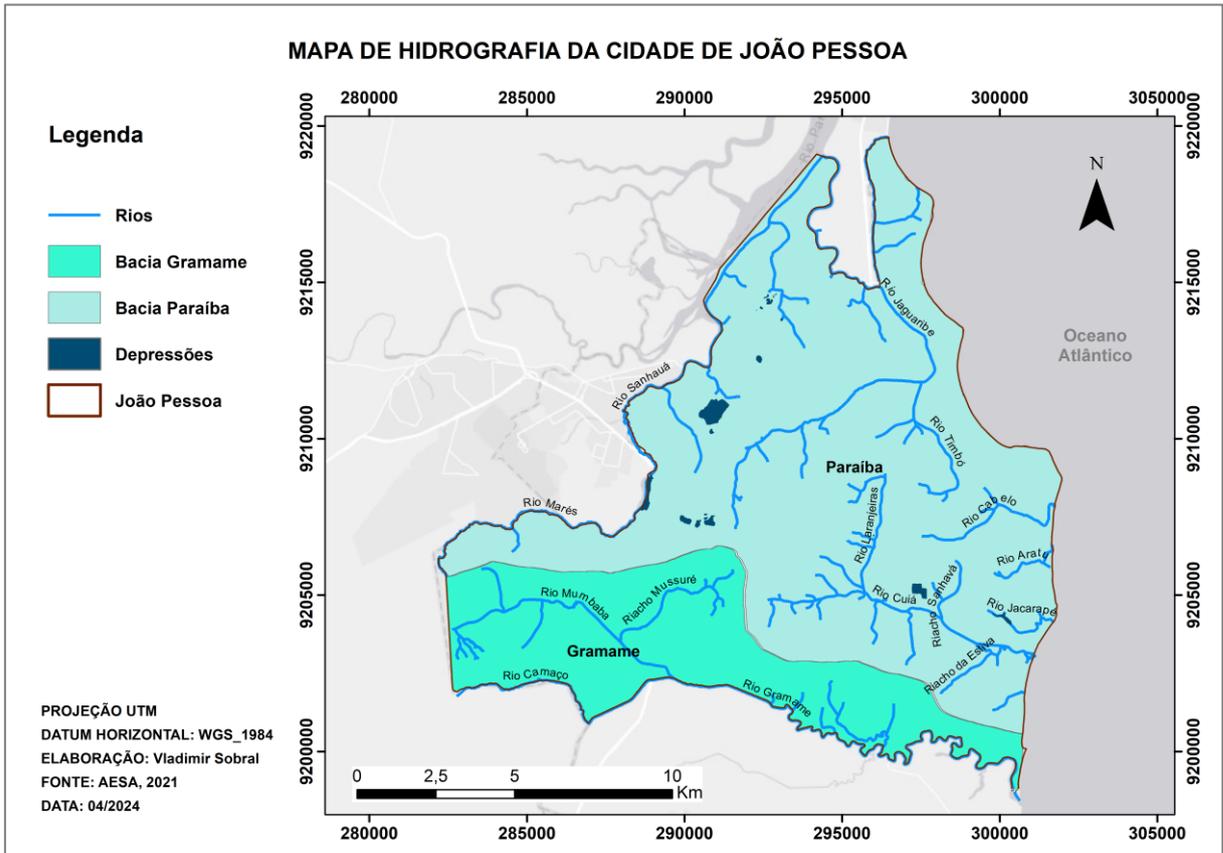
### 5.3. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

#### a. Hidrografia

Segundo a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs), o município de João Pessoa encontra-se inserido nas Bacias Hidrográficas do Paraíba e do Gramame, compostas pela presença de muitos rios e afluentes, além de ecossistema costeiro e estuarino (AESAs, 2021). A bacia hidrográfica do Rio Gramame abrange uma área de aproximadamente 588,59 km<sup>2</sup> e é responsável por cerca de 60% do abastecimento público local (PMJP, 2021). Já a bacia do Rio Paraíba é a segunda maior do estado e abrange 38% do seu território. Por permear grandes centros urbanos como João Pessoa e Campina Grande, é considerada a bacia mais importante do Estado (PMJP, 2021). Além dos rios referentes as bacias hidrográficas, outros rios de fluxo perene são: Sanhauá, Tambiá, Jaguaribe, Tiombó, Cuiá, Cabelo, Aratú, Jacarapé, Camarupim e Mumbaba (Figura 18). Devido à ação da urbanização, alguns destes rios apresentam áreas vulneráveis à ocorrência de inundações, erosões e movimentos de massa.

Na região oeste da cidade, sob a bacia do Paraíba, encontram-se depressões fechadas circulares e alongadas preenchidas de água, entre elas a Lagoa do Parque Solon de Lucena (bairro Centro), depressão do Bairro Distrito Mecânico, Lagoa Antônio Lins (bairro Cruz das Armas), Lagoa do Buracão (bairro Cidade dos Funcionários) e a região do Parque Aquático das Três Lagoas (bairros Ernani Sátiro e Jardim Veneza).

Figura 18 - Mapa de hidrografia da cidade de João Pessoa



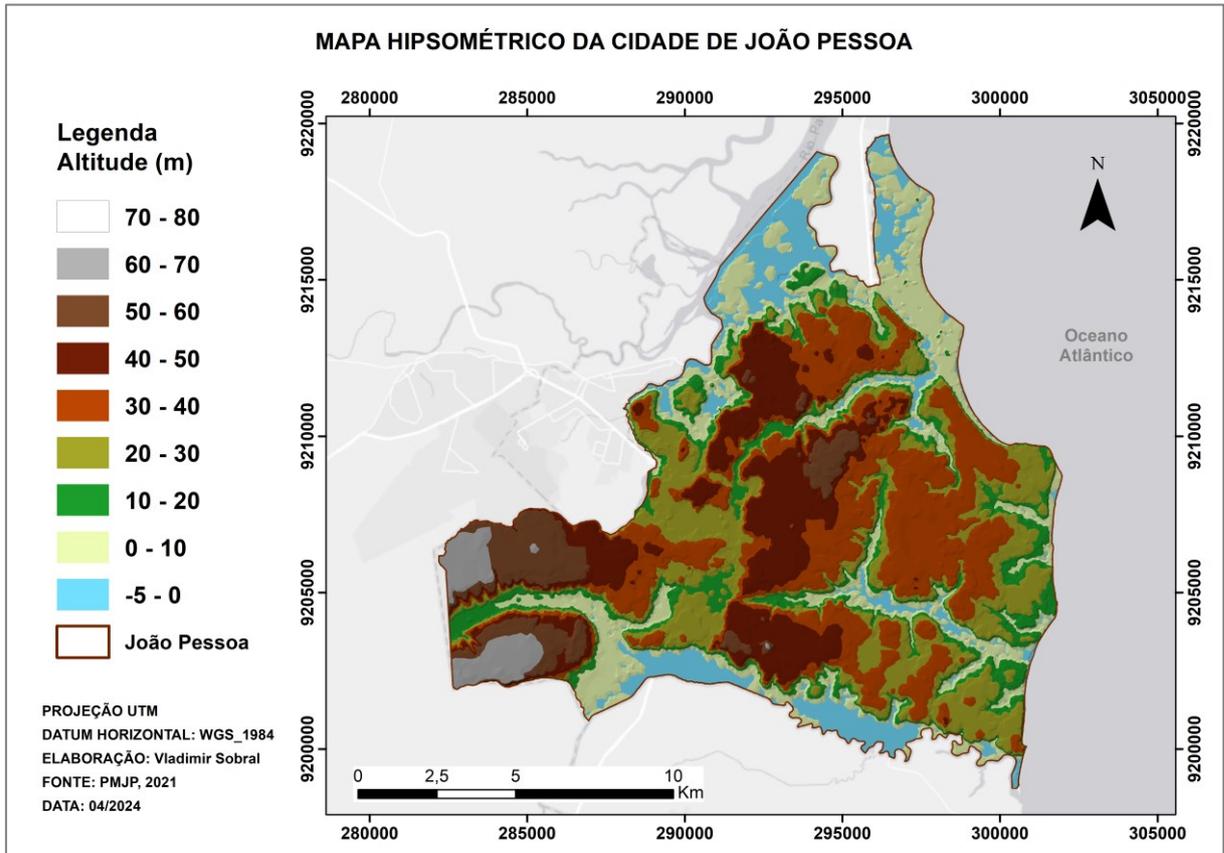
Fonte: Adaptado de AESA, 2021.

## b. Relevo

A cidade situa-se predominantemente sobre a unidade dos Baixos Planaltos Costeiros ou Tabuleiros, presentes por todo o litoral do Nordeste brasileiro (BARBOSA, 2015). Os Tabuleiros apresentam subcompartimentos topográficos, representados, ora por topos planos, ora pelas falésias vivas e mortas, quando se aproximam do mar. Cotas altimétricas máximas alcançam valores próximos aos 72 m na região oeste da cidade e valores mínimos abaixo do nível do mar, em região de extração mineral (Figura 19).

Outras unidades geomorfológicas presentes na cidade são as planícies aluviais e fluviomarinhas, que correspondem às áreas planas ou levemente inclinadas, constituídas, principalmente, por materiais arenosos, areno-argilosos, material orgânico, argilosos e cascalheiras (PMJP, 2010). Segundo dados da PMJP (2021) a maior parte do município apresenta valores de declividade que variam entre 0 e 12%, com as maiores declividades encontradas em áreas próximas as falésias de bairros como Cabo Branco, Altiplano Cabo Branco, Seixas e Gramame.

Figura 19 - Mapa hipsométrico da cidade de João Pessoa



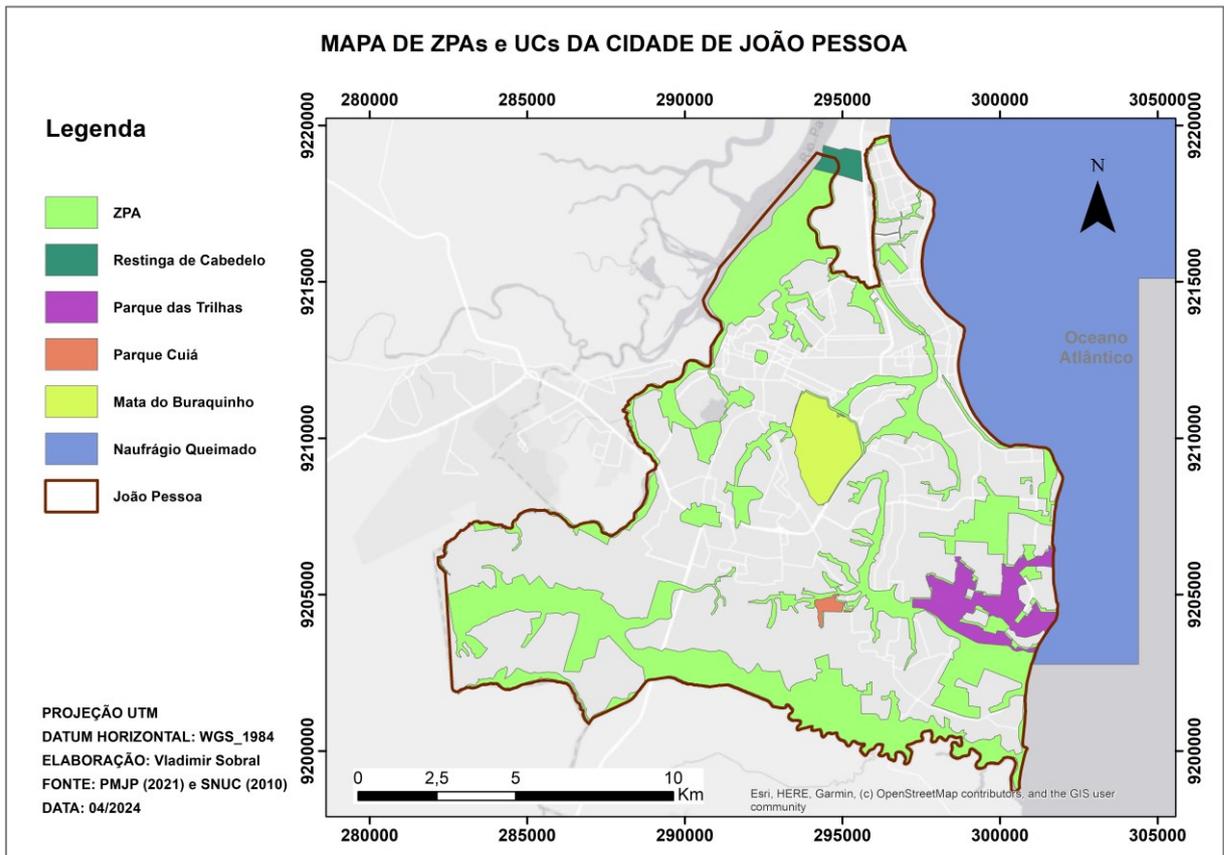
Fonte: PMJP (2021).

### c. Cobertura vegetal

Segundo a Secretaria de Meio Ambiente da PMJP (JOÃO PESSOA, 2012), a cidade de João Pessoa encontra-se no domínio da Mata Atlântica, que corresponde às matas de encosta ou florestas costeiras brasileiras. Entre os tipos de formação florestais existentes na cidade encontram-se a Floresta Estacional Semidecidual, a Floresta Ombrófila Densa, os manguezais, a vegetação de restinga, além da arborização urbana (BARBOSA, 2015).

De acordo com o Macrozonamento da cidade de João Pessoa, as Zonas de preservação Ambiental (ZPAs) são encontradas em nascentes e matas ciliares, restingas, manguezais, bordas de tabuleiros e mananciais (PMJP, 2021). Dados consolidados do Sistema Nacional de Unidades de Conservação Brasileiras (SNUC, 2019) mostram que João Pessoa abriga as seguintes unidades em âmbito federal, estadual e municipal: Refúgio de Vida Silvestre Mata do Buraquinho, Parque Estadual das Trilhas, Floresta Nacional da Restinga de Cabedelo, Parque Natural Municipal do Cuiá e a Área de Proteção Ambiental Naufrágio Queimado (Figura 20).

Figura 20 - Mapa de ZPAs e UCs da cidade de João Pessoa



Fonte: Adaptado de JOÃO PESSOA (2012) e SNUC (2010)

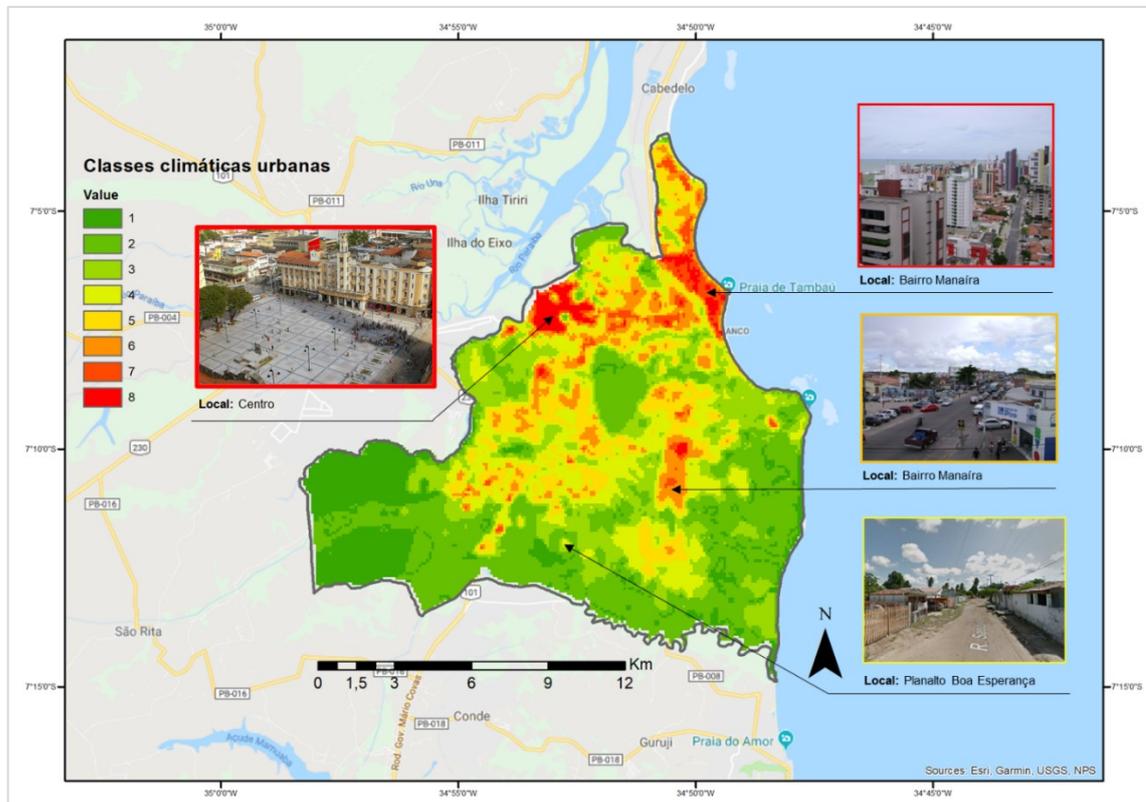
#### 5.4. ESTUDOS LOCAIS DO CLIMA URBANO

Desde meados da década de 2000, o número de estudos sobre o clima urbano na cidade de João Pessoa é crescente, representado principalmente por trabalhos acadêmicos locais (SILVA, 1999; PEREGRINO, 2005; CARVALHO, 2006; SANTOS, 2007). Estas pesquisas avaliaram as relações entre padrões de ocupação do solo de frações da cidade e atributos climáticos locais com o objetivo de propor recomendações climáticas ao planejamento urbano local. Todos estes estudos demonstraram que o padrão vigente de ordenamento urbano da cidade contribuía para o aumento agressivo da rugosidade urbana frente aos ventos, formação do fenômeno Ilha de Calor Urbana e de regiões termicamente desconfortáveis.

Na escala da cidade, Souza (2010) elaborou o primeiro mapa climático urbano (MCU) local, em resolução espacial de 100 m, a partir de análises de parâmetros urbanos que se inter-relacionam e determinam a formação de diferentes topoclimas. Para tanto, utilizou-se de metodologia alemã de construção de mapas climáticos (VDI 3797, 2015) que caracteriza o clima segundo o balanço de energia da cidade, determinado

pela sua carga térmica e potencial dinâmico. Como pode ser visto na Figura 21, constata-se que várias regiões da cidade comprometem em diferentes graus o conforto térmico da população pessoense.

Figura 21 - Mapa climático urbano da cidade de João Pessoa



Fonte: Adaptado de Souza (2010).

Um outro estudo em escala de cidade foi desenvolvido por Santos et al. (2011), em que os autores analisaram o campo térmico urbano e a sua relação com as diversas formas de uso e cobertura do solo do município. Os resultados da pesquisa mostraram que a amplitude térmica do ar na cidade oscilou em torno de 10 °C, com registros máximos entre 12h e 14h e mínimos nas primeiras horas do período diurno. A pesquisa também avaliou a intensidade máxima de Ilha de Calor Urbana e encontrou valores que variaram entre 3,33 e 5,32 °C, com os maiores registros no período seco, geralmente ocorrendo durante o período noturno. No entanto, a intensidade máxima dos gradientes de temperatura ocorreu durante o dia, associados as horas de maior insolação.

No que diz respeito ao impacto da vegetação na amenização climática de João Pessoa, o estudo de Bezerra, Santos, Aguiar (2013) verificou as variações da temperatura e umidade relativa do ar em duas áreas representativas de condições

microclimáticas do município: a reserva florestal Mata do Buraquinho e a área da estação meteorológica convencional do INMET. A pesquisa demonstrou que durante os meses de fevereiro e junho de 2012, os maiores registros de temperatura do ar (°C) foram obtidos na área da estação meteorológica, contudo os valores médios mensais de temperatura máxima do ar (°C) apresentaram pouca diferença entre as duas áreas (média de 0,58°C). De modo oposto, os maiores valores de umidade relativa do ar (%) foram obtidos na reserva florestal, com uma diferença de 2,55 pontos percentuais comparados à estação do INMET.

O comportamento da temperatura de superfície terrestre (LST) e da UHI de superfície da cidade de João Pessoa foi avaliado por Silva et al. (2022) com base em imagens de satélite em quatro períodos distintos (1991, 2006, 2010 e 2018). Os resultados mostraram que a temperatura de superfície variou de 22,24 °C a 34,64 °C, com maiores valores registrados nas regiões nordeste e sudoeste da cidade, devido a alta densidade urbana e impermeabilidade do solo. De modo oposto, em grandes áreas verdes como a Mata do Buraquinho foram observados os menores valores de LST. Com relação à UHI de superfície, a pesquisa constatou que regiões densamente povoadas, entre elas os bairros do Geisel, Valentina, Cristo Redentor e Mangabeira, apresentaram as mais altas diferenças de temperatura de superfície.

Os estudos apresentados evidenciam a necessidade de se conhecer as particularidades climáticas urbanas das diversas regiões da cidade. Fatores como a densidade populacional, o uso e ocupação do solo, a redução da cobertura vegetal, a elevada impermeabilização do solo e a geometria e altura das edificações, estão contribuindo para o aumento da temperatura de superfície, a formação de UHI e a redução do conforto térmico. A identificação de áreas de elevado estresse térmico em escala microclimática é uma informação essencial na elaboração de medidas de mitigação e adaptação ao calor extremo, especialmente em períodos de Ondas de Calor, auxiliando no planejamento urbano sensível ao clima.

## 6. METODOLOGIA

### 6.1. Características do método

O método proposto nesta tese se apresenta em uma abordagem **hipotético-dedutiva** com finalidade **aplicada**. Desse modo, foram elaboradas hipóteses para explicar as questões norteadoras da tese (página 20), que, se corroborada pela pesquisa, pode contribuir para a formulação de diretrizes de mitigação e adaptação às OC na cidade de João Pessoa. Para confirmar, ainda que provisoriamente, a viabilidade das hipóteses, esta pesquisa revestiu-se de um caráter **interdisciplinar**, visto que o arcabouço analítico desta tese se alicerçou em distintas áreas do conhecimento.

Sob o olhar da Meteorologia, a pesquisa define OC como um episódio esporádico e extremo, que ocorre quando a T<sub>max</sub> atinge valores acima do 90º percentil e a T<sub>min</sub> acima da média da série histórica, durante 3 dias consecutivos ou mais. A qualidade térmica ambiental urbana da cidade foi avaliada segundo a Climatologia Urbana, por meio da modelagem de parâmetros climáticos fundamentais na análise do conforto térmico, entre eles a temperatura radiante média e a velocidade do vento. Por fim, sob o ponto de vista da Biometeorologia Humana, o estresse térmico da população de João Pessoa é avaliado por meio do índice PET (°C), fundamentado no balanço de calor do corpo humano. Além disso, este método se utiliza de uma análise espacial de multiescala ao empregar modelos numéricos de mesoescala e microescala.

As análises da qualidade térmica ambiental urbana e da sensação térmica da população de João Pessoa levaram esta pesquisa a assumir um enfoque tanto **quantitativo como qualitativo**, enfoques estes complementares e não antagônicos, uma vez que, segundo Bauer e GasKell (2002, p.24), “não há quantificação sem qualificação” e “não há análise estatística sem interpretação”.

Quanto ao objetivo, esta pesquisa enquadra-se como **explicativa**, pois pretende encontrar um método inédito aplicável à cidade de João Pessoa com base no conforto térmico da população local ao calor extremo, decorrente de um momento de Onda de Calor, para com isso contribuir com a formulação de diretrizes de planejamento urbano da cidade e, conseqüentemente, reduzir o impacto negativo destes episódios extremos em populações vulneráveis ao estresse térmico. Ademais, esta pesquisa pretende trazer luz à ocorrência de Ondas de Calor de João Pessoa entre os anos de 2010 e 2023.

## **6.2. Descrição dos procedimentos metodológicos**

### **6.2.1. Abordagem meteorológica**

#### **a. Seleção dos dados meteorológicos e recorte temporal**

Os dados meteorológicos utilizados para a realização desta pesquisa foram: a temperatura máxima do ar ( $T_{max}$ , °C), a temperatura mínima do ar ( $T_{min}$ , °C), a umidade relativa do ar (UR, %), a velocidade do vento ( $V_{vel.}$ , m/s), a direção do vento ( $V_{dir.}$ , graus), a precipitação total (Prec., mm) e a radiação global (Rad.,  $Kj/m^2$ ). Estas variáveis foram selecionadas devido a ampla aplicação em estudos de OC e de avaliação da sensação térmica humana em espaços urbanos. Todos os atributos foram analisados de forma estatística, contudo a  $T_{max}$  (°C) e a  $T_{min}$  (°C) foram também utilizadas para a caracterização das OC.

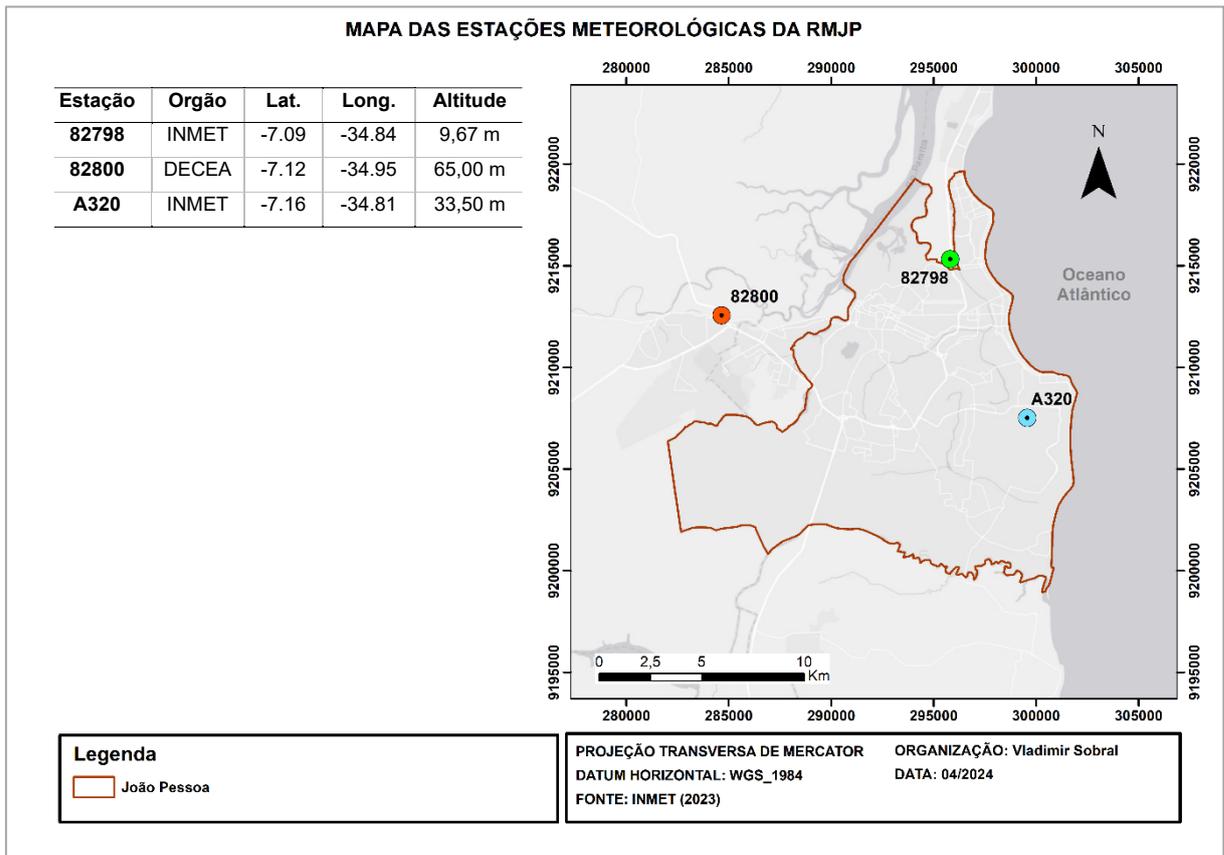
O recorte temporal adotado para a coleta dos dados foi de 1 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2023, que compreende um período de 14 anos. A série histórica foi assim selecionada, pois o foco da pesquisa é retratar o conforto térmico da população segundo o seu arranjo espacial mais recente e os dados do Censo de 2022. Portanto, julgou-se desnecessário utilizar um histórico maior, como o das normais climatológicas (1991-2020), por exemplo.

#### **b. Coleta e tratamento dos dados meteorológicos**

Os registros observados mensais, diários e horários dos dados meteorológicos foram obtidos de três estações meteorológicas localizadas na Região Metropolitana de João Pessoa (RMJP). Estas estações são gerenciadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). O emprego das três estações na identificação de Ondas de Calor na cidade tem o objetivo de confirmar o efeito do aumento da temperatura do ar em mais de uma região da cidade. Na Figura 22 são apresentadas informações das estações meteorológicas utilizadas na pesquisa.

Todos os dados foram computados em planilhas eletrônicas no aplicativo Excel (versão 2020) da empresa Microsoft, formando um banco de dados em que é possível a manipulação e tratamento das informações, conforme os objetivos de cada etapa metodológica.

Figura 22 - Informações das estações meteorológicas utilizadas na pesquisa.



Fonte: INMET (2022)

Dados meteorológicos não registrados pelas estações foram tratados a partir da técnica de imputação de dados conhecida por Média Aritmética Simples, para garantir uma maior qualidade na obtenção dos resultados. Segundo Meirelles et al. (2016, p. 170), esta técnica consiste na soma dos valores anterior e posterior à falha e, em seguida, divide-se o resultado por dois. A Equação 2 representa a média aritmética simples para a imputação de dados faltantes:

$$\bar{x} = \frac{x_{i-1} + x_{i+1}}{2}, \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:  $\bar{x}$  é a média dos dias anterior e posterior,  $x_{i-1}$  é o dia anterior e  $x_{i+1}$  é o dia posterior.

Cabe salientar que outras técnicas, como a Média Móvel, Regressão Linear Simples e Média Preditiva Correspondente (MPC), podem ser mais adequadas na replicação do método aqui proposto em outras cidades, a depender do número de dados faltantes.

### **c. Análises estatísticas dos dados meteorológicos**

Uma estatística descritiva univariada foi elaborada com o objetivo de obter-se uma compreensão sumarizada do comportamento dos dados utilizados ao longo da série temporal. Adicionalmente, realizou-se uma comparação dos resultados com os valores das normais climatológicas (INMET, 2022), para avaliar desvios climáticos e tendências no período analisado. No software Excel foram computados a média aritmética, mediana, moda, desvio padrão, gradiente, valor mínimo, valor máximo e 90° percentil (FÁVERO e BELFIORI, 2017).

Destaca-se que, para a série do atributo precipitação, por orientação do INMET (2022), não foram calculados valores médios e desvio-padrão, considerando que os totais pluviométricos são distribuídos assimetricamente nas regiões. Assim, apenas os valores totais, máximos, mínimos e o gradiente foram computados.

Para a compreensão de uma possível associação entre os atributos climáticos empregou-se uma estatística descritiva bivariada. Aplicou-se o coeficiente de correlação de Spearman para avaliar o grau de correlação entre duas variáveis. Diferente do coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de Spearman avalia a associação entre variáveis sem a necessidade de uma relação linear, além de não pressupor normalidade dos dados (FÁVERO e BELFIORI, 2017). O grau de correlação é expresso em uma escala de  $-1$  (correlação negativa perfeita) a  $+1$  (correlação positiva perfeita). Valores próximos a 0 indicam uma inexistência de correlação. As interpretações dos valores do coeficiente de correlação podem ser vistas na Quadro 3.

A análise de possíveis tendências observadas nos atributos Tmax (°C), Tmin (°C), Vvel. (m/s) e UR (%) foi realizada com o teste de tendência de Mann-Kendall. O teste de Mann-Kendall é considerado um dos métodos mais apropriados para analisar a significância de possíveis mudanças climáticas em séries temporais climatológicas (BRASIL, 2016, p. 260). Considerando o intervalo de confiança de 5%, o valor de S indica a tendência de uma variável, em que um valor negativo para S aponta uma tendência decrescente ao longo do tempo, e um valor positivo de S indica uma tendência ascendente ao longo do tempo. Um valor S próximo a zero indica a ausência de tendência (MANDÚ et al., 2020).

Quadro 3 - Interpretações dos valores do coeficiente de correlação de Spearman.

Coeficiente	Interpretação
$r = +1$ ou $-1$	Correlação Perfeita
$0,75 < r < 1,00$ ou $-1,00 < r < -0,75$	Correlação Forte
$0,50 < r < 0,75$ ou $-0,75 < r < -0,50$	Correlação Moderada
$0,25 < r < 0,50$ ou $-0,50 < r < -0,25$	Correlação Fraca
$0 < r < 0,25$ ou $-0,25 < r < 0$	Correlação Pequena ou Nula

Fonte: Fávero e Belfiori, 2017.

A aplicação do Teste de Mann-Kendall ocorreu no ambiente R por meio de um pacote de sua biblioteca (`rank.tests`). Conforme Venables et al. (2023), o modelo R é um ambiente (sistema) integrado de técnicas estatísticas, organizadas em pacotes, empregado na manipulação de dados, cálculos e gráficos.

#### **d. Caracterização dos episódios de Ondas de Calor.**

Os dados diários de  $T_{max}$  ( $^{\circ}C$ ) e  $T_{min}$  ( $^{\circ}C$ ) registrados nas três estações meteorológicas foram utilizados para a determinação dos episódios de Ondas de Calor. Empregou-se o trabalho de Robinson (2001) e Geirinhas et al. (2017) como referência para a definição de OC desta pesquisa. Desse modo, uma OC foi identificada por meio do limiar combinado, quando  $T_{max}$  atingiu valores acima do 90º percentil e a  $T_{min}$  atingiu valores acima da média da série histórica, durante 3 dias consecutivos ou mais. Apesar desta definição reduzir o número de OC ao longo de uma série temporal comparado a outras definições, Yang et al. (2020) identificaram que o limiar combinado teve uma melhor performance em simulações numéricas com modelos climáticos globais.

Para a descrição estatística das OC serão utilizadas métricas amplamente aplicadas em estudos deste tipo de evento extremo, a saber: número de episódios, duração, data inicial, frequência, amplitude média, taxa de ascensão e taxa de declínio (PERKINS, 2015; HOBDAIY et al., 2016). As definições e equações das métricas utilizadas na pesquisa são detalhadas no Apêndice 01.

Todas estas métricas foram calculadas no ambiente R com o uso do pacote `heatwaveR`, versão 0.4.4. O pacote `heatwaveR` foi desenvolvido, inicialmente, para ajudar na identificação de ondas de calor e de frio marítimas e depois adaptado para

às OC atmosféricas. O script foi escrito por Eric C. J. Oliver em uma linguagem Python (SCHLEGEL; SMIT, 2018). Diniz (2022) e Tassone et al. (2022) empregaram este pacote estatístico.

#### **e. Impacto de Ondas de Calor na meteorologia local**

Como forma de compreender o impacto de Ondas de Calor na variabilidade dos dados meteorológicos coletados, selecionou-se três episódios com os seguintes critérios: i) episódios identificados em períodos concomitantes em duas estações meteorológicas. O objetivo deste critério é selecionar Ondas de Calor que atuaram ao longo do território da cidade de João Pessoa, evitando que efeitos térmicos localizados pudessem falsear a ocorrência de um episódio; ii) episódios ocorridos entre os meses de dezembro e abril. Esta pesquisa restringiu-se a estação verão, contudo os meses contíguos foram adicionados, dado que alguns episódios poderiam ter dias fora do período do verão; e iii) episódios em que foram registrados valores nulos ou reduzidos de precipitação.

Considerando todas as OC identificadas da série temporal da pesquisa, quatro eventos atenderam os critérios acima listados. Como forma de facilitar a nomeação das OC selecionadas, assim como a identificação da data de início, foram utilizadas a estação convencional 82798 como referência. Desse modo, os eventos extremos selecionados foram:

1. EV01 (com início em 07/01/2019 e quatro dias de duração);
2. EV02 (com início em 11/04/2020 e quatro dias de duração);
3. EV03 ( com início em 30/11/2021 e sete dias de duração); e
4. EV04 (com início em 11/03/2023 e quatro dias de duração).

Apesar desta forma de nomeação, respeitou-se a duração de cada episódio identificado nas três estações meteorológicas para fins de análise dos parâmetros meteorológicos. No Apêndice 2 podem ser identificadas as datas de cada evento selecionado e informações dos dados meteorológicos.

A análise da variabilidade dos dados meteorológicos seguiu as pesquisas de Li e Bou-Zeid et al. (2013) e Giannaros et al. (2023), que determinaram 3 períodos de análise distintos para caracterizar atributos meteorológicos durante eventos extremos de calor, a saber: período Pré-OC (dois dias anteriores à Onda de Calor), período DOC (dias da Onda de calor) e Pós-OC (dois dias após a Onda de Calor).

#### **f. Modelagem numérica atmosférica de mesoescala**

Após a seleção dos estudos de caso, foram realizadas simulações numéricas de mesoescala no modelo atmosférico *Weather Research and Forecasting* (WRF, versão 4.5.2). Estas simulações tiveram como objetivo o mapeamento dos dados meteorológicos necessários ao mapeamento da sensação térmica da população de João Pessoa em um momento de calor extremo. Devido ao elevado número de dias e questões de processamento computacional, não foi realizada a simulação numérica do EV03. Os procedimentos da modelagem no modelo WRF são demonstrados a seguir.

#### **g. Coleta de dados meteorológicos globais e estáticos**

Os dados de condições iniciais da atmosfera e de condições de contorno lateral necessários às simulações foram obtidos do produto *National Center for Environmental Prediction* NCEP GDAS/FNL (Final) *operational global analysis and forecast* (NCEP, 2000). Este produto é derivado do *Global Data Assimilation System* (GDAS), que continuamente coleta dados observados do Sistema de Telecomunicações Globais (STG). Tem um espaçamento de grade de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , seis horas de resolução temporal e 26 níveis verticais.

Os dados geomorfológicos, também conhecidos como dados estáticos, foram utilizados de uma recente atualização revisada por Pedruzzi et al. (2022), que substituiu o padrão de entrada de dados espaciais do modelo WRF. Estes dados revisados foram elaborados a partir de informações do projeto MapBiomass (SOUZA et al., 2020), com resolução espacial de 30 m, e dos produtos Soil Grids (HENGL et al., 2014), com resolução de 250 m.

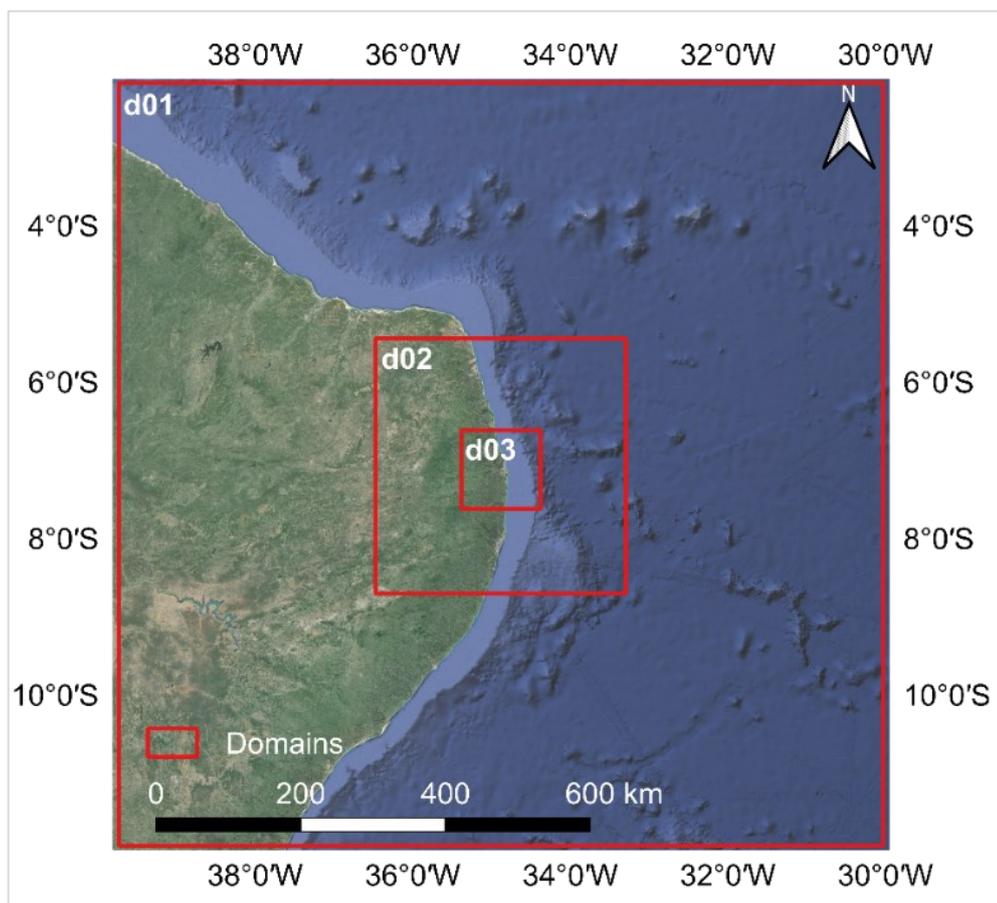
#### **h. Sequência e parâmetros da modelagem numérica de mesoescala**

Após a coleta dos dados, as informações foram aplicadas no sistema de Pré-processamento do WRF (WPS), formado pelos componentes GEOGRID, UNGRIB e METGRID. Posteriormente, os dados de saída do WPS são passados para o núcleo ARW. Por fim, os dados gerados no WRF foram extraídos com a ferramenta Postwrf (Nikfal, 2023) e processados em ferramentas de visualização (NCL e ArcGis), que permitiram a elaboração de mapas e relatórios das variáveis avaliadas.

Para uma melhor representação espacial dos fenômenos atmosféricos na escala regional foram utilizados 3 domínios, em uma proporção de 3:1 (Figura 23). Utilizou-

se o aninhamento de grade *two-way*, que permite a troca de informação entre ambos e execução simultânea. O domínio 1 (d01) contou com uma resolução de 9 km, cobriu grande parte do Nordeste brasileiro e apresentou uma resolução de grade de 120 x 121 células. O domínio 2 (d02) teve uma resolução de 3 km, abrangeu parte do estado da Paraíba e estados vizinhos e teve uma resolução de grade de 118 x 112 células. Por fim, o domínio 3 (d03) foi determinado com uma resolução de 1 km, cobriu a cidade de João Pessoa e cidades vizinhas e apresentou uma resolução de grade de 112 x 112 células), centralizado na latitude 7.07° S e longitude 34.88° W.

Figura 23 - Domínios utilizados no modelo WRF.



Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto à resolução vertical foi utilizado a opção *auto levels* (`auto_levels_opt = 2`) para, automaticamente, estabelecer os níveis verticais considerando a altura máxima do nível inicial (`dzbot`) configurado para 20 m, e o espaçamento vertical máximo entre camadas (`max_dz`) de 1000 m. Estes parâmetros resultaram em um total de 44 níveis verticais sobre todos os domínios do modelo, com o topo do modelo configurado para 50 hPa. No Quadro 4 é apresentado um resumo das configurações de grid do modelo WRF.

Quadro 4 - Configuração de grid utilizados no modelo WRF.

Configurações dos Domínios	Domínios		
	d01	d02	d03
Espaçamento de grade	9 km	3 km	1 km
Número de colunas	120	118	112
Número de linhas	121	121	112
Camadas verticais	44	44	44
Centro do grid	7.07° S; 34.88° W		

Fonte: Elaborado pelo Autor

Até o momento desta pesquisa, não foram encontrados estudos que avaliaram a eficácia das parametrizações do modelo WRF com foco na escala urbana para regiões do estado da Paraíba. Desse modo, utilizaram-se as parametrizações derivadas de Kitagawa et al. (2022) e Pedruzzi et al. (2022), que avaliaram a performance do modelo WRF utilizando esquemas de modelo dossel urbano e informações atualizadas de uso e cobertura do solo, respectivamente.

Para se obter melhores resultados do modelo, foram utilizados dois conjuntos de parametrizações, que se diferem apenas pelo esquema de camada limite planetária (*planetary boundary layer - pbl*). Conforme Imran et al. (2018), comparado à demais parametrizações, a escolha do esquema de parametrização *pbl* tem uma forte influência nos resultados de simulações de OC no modelo WRF. O primeiro conjunto (S1) empregou o esquema YSU (HONG et al., 2006) e o segundo conjunto (S2) empregou o esquema Boulac (BOUGEAULT E LACARRERE, 1989). Os demais esquemas de parametrizações permaneceram os mesmo para os dois conjuntos. As parametrizações físicas utilizados no modelo WRF estão apresentados na Quadro 5.

As primeiras 12 h de simulação foram descartadas como *spin-up*. Seis simulações foram performadas, totalizando 480 horas em cada simulação, com uma frequência de saída de dados de 1 hora, cobrindo os três eventos de Ondas de Calor selecionados (EV01, EV02 e EV04).

Quadro 5 - Esquemas de parametrizações utilizados no modelo WRF.

<b>Parametrizações (conjuntos)</b>	<b>Esquemas</b>	<b>Fontes</b>
Planetary boundary layer ( <i>bl_pbl_physics</i> ) – S1	YSU	Hong et al., 2006
Planetary boundary layer ( <i>bl_pbl_physics</i> ) – S2	BouLac	Bougeault and Lacarrere, 1989
Microphysics ( <i>mp_physics</i> ) – S1/S2	Thompson	Thompson et al., 2008
Cumulus ( <i>cu_physics</i> ) – S1/S2	Grell–Freitas Ensemble	Greel and Greitas, 2014
Surface layer ( <i>sf_sfclay_physics</i> ) – S1/S2	Revised MM5	Chen and Dudhia, 2001
Land surface model ( <i>sf_surface_physics</i> ) – S1/S2	Noah	Tewari et al., 2004
Short-wave (SW) radiation ( <i>ra_sw_physics</i> ) – S1/S2	RRTMG	Iacono et al., 2008
Long-wave (LW) radiation ( <i>ra_lw_physics</i> ) – S1/S2	RRTMG	Iacono et al., 2008
Urban ( <i>sf_urban_physics</i> ) – S1/S2	Single Layer UCM (SLUCM)	Chen et al., 2011

Fonte: Elaborado pelo Autor

### **i. Avaliação da performance do modelo WRF**

Para a avaliação da performance do modelo WRF foram realizadas comparações estatísticas entre os dados meteorológicos observados e os dados simulados de pontos de grade do modelo, segundo definido por Emery et al. (2001). Conforme os autores, para cada atributo climático devem ser aplicados cálculos de índices estatísticos adequados e seus resultados comparados com valores de referência (*benchmark*), indicando assim as simulações que obtiveram os melhores desempenhos.

Os índices viés médio (*mean bias* – MB), erro médio absoluto (*mean absolute gross error* – MAGE) e raiz do erro quadrático médio (*root mean square error* - RMSE) referem-se a erros e desvios do modelo. Desse modo, a alta qualidade das simulações deve ter valores mais próximos a zero (KITAGAWA et al., 2022). O índice de concordância (*index of agreement* - IOA) é um índice de associação de concordância

entre dados observados e simulados, no qual zero indica ausência de correlação e valores mais próximos a 1 indicam forte correlação. A definição dos indicadores estatísticos e respectivas equações podem ser vistas no Apêndice 3.

Para estes testes, utilizaram-se as variáveis temperatura do ar (T2) a 2 m, umidade relativa do ar (rh2) a 2 m e velocidade do vento (WSP10) a 10 m. Importante ressaltar que este estudo não pretende realizar qualquer teste de sensibilidade do modelo, mas sim selecionar a simulação que obteve a melhor acurácia e reprodutibilidade espacial das três variáveis citadas anteriormente. Os valores de referência para cada variável são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Índices estatísticos e valores de referência.

Variável Meteorológica	Índice	Referência (Benchmark)
Temperatura do ar (2m)	MB (°C)	$\leq \pm 0,50$
	MAGE (°C)	$\leq 2,00$
	IOA	$\geq 0,80$
Umidade relativa (2m)	MB (%)	$< \pm 10,00$
	MAGE (%)	$< 20,00$
	IOA	$\geq 0,60$
Velocidade do vento (10m)	MB (m/s)	$\leq \pm 0,50$
	RMSE (m/s)	$\leq 2,00$

Fonte: Adaptado de Emery et al. (2001) e Hall et al. (2012).

#### j. Análise horizontal de dados meteorológicos modelados pelo WRF

Com a validação dos resultados do modelo WRF, foram extraídas informações de seis atributos meteorológicos próximos à superfície, a saber: temperatura do ar (T2), umidade relativa do ar (rh2), velocidade do vento (Vvel.), Radiação global (Rad), Fluxo de calor sensível (Qh) e Fluxo de calor latente (Qe) (Quadro 7). Apesar de a modelagem atmosférica ter se utilizado de três domínios, os resultados demonstrados referem-se apenas aos limites territoriais e entorno imediato da cidade de João Pessoa.

Realizou-se uma avaliação horizontal dos dados extraídos do modelo com dois objetivos: o primeiro, compreender a dinâmica espacial dos atributos climáticos em horário de maior valor de Tmax (°C); o segundo, gerar as informações meteorológicas necessárias ao mapeamento da sensação térmica humana ao longo da área urbana da cidade de João Pessoa no modelo microclimático UMEP.

Quadro 7 - Variáveis incluídas como dados meteorológicos de entrada do modelo UMEP.

Abrev.	Descrição	Unid.	Abrev.	Descrição	Unid.
T2	Temperatura do ar	°C	Rad	Radiação global	W/m <sup>2</sup>
rh2	Umidade relativa do ar	%	Qh	Fluxo de calor sensível	W/m <sup>2</sup>
Vvel.	Velocidade do vento	m/s	Qe	Fluxo de calor latente	W/m <sup>2</sup>

Fonte: Elaborado pelo Autor

## 6.2.2. Abordagem climática urbana

### a. Mapeamento da TRM (°C) e da WSPEED (m/s)

Com os resultados da validação dos dados do modelo WRF, selecionou-se o dia 13/04/20 às 16h UTC do evento EV02 para o mapeamento da TRM (°C) e da WSPEED (m/s) cidade de João Pessoa. Este mapeamento foi realizado por meio do modelo Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP, versão 4.04) (LINDBERG et al., 2018), com os módulos SOLWEIG e URock.

### b. Dados espaciais da cidade de João Pessoa

Os dados espaciais utilizados nesta pesquisa retratam aspectos do relevo, da geometria urbana, da cobertura vegetal e do tipo de solo da cidade. Estas informações foram obtidas em diferentes fontes, principalmente públicas, e tratadas segundo os objetivos da pesquisa (Quadro 8). Os mapas referentes a estes dados podem ser vistos no Apêndice 4.

Os dados de relevo foram obtidos do produto ALOS PALSAR *Radiometrically Terrain-Corrected*, com resolução espacial de 12,5m no formato GeoTiff (ASF, 2020). Segundo Silva Junior et al. (2020), este produto apresentou melhor acurácia altimétrica, comparada ao ASTER (GDEM) Versão 3, na elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) da cidade de Recife – PE, que apresenta características ambientais e morfológicas similares ao da cidade de João Pessoa. Com este produto elaborou-se um MDE para a cidade de João Pessoa.

Com relação as informações da geometria urbana local, os dados retratam a delimitação e altura das edificações do meio urbano. Estes dados foram construídos a partir de informações da Prefeitura Municipal de João Pessoa (PMJP, 2021), da plataforma OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>), do Google Earth Pro (<http://earth.google.com/>), e do Google Earth Engine (GORELICK et al., 2017), com o uso do script Open Buildings dataset (SIRKO et al., 2021). Ao final do tratamento

destes dados, elaborou-se um arquivo shapefile com informações tridimensionais das edificações da cidade (arquivo 3D-EDIF).

Os dados de cobertura vegetal levantados nesta pesquisa referem-se às árvores localizadas, principalmente, em vias públicas, praças, parques e áreas verdes urbanas. Estes dados foram elaborados a partir das informações do ESRI 2020 Global Land Use Land Cover (LULC), que é um produto derivado de imagens do satélite Sentinel-2 com 10 m de resolução (KARRA et al., 2021). Este produto contém oito categorias de superfície do solo, entre elas árvores, vegetação rasteira e corpos d'água. Para complementar a informação da cobertura vegetal referente as árvores das vias públicas, utilizou-se o ESRI 2021 basemap do software ArcGIS para criar um shapefile de pontos com a localização destas árvores (arquivo ARVORE).

Por fim, para as informações de cobertura do solo foi realizada uma classificação de imagem com base nas informações do ESRI 2021 Basemap do software ArcGIS. O tipo de cobertura de solo em cada bairro foi categorizado, segundo a classificação de tipos de solo do UMEP em sete categorias (Pavimento, Edifícios, Arbustos e Árvores Perenes, Arbustos e Árvores Caducifólias, Grama, Solo Exposto e Água). Desse modo, gerou-se um arquivo em formato shapefile (SOLO) com todas as categorias.

Quadro 8 - Dados espaciais utilizados na pesquisa.

<b>Dados</b>	<b>Descrição (tipo de arquivo)</b>	<b>Resolução Espacial</b>	<b>Fonte</b>
MDE	Modelo digital de elevação (raster)	12,5 m	ALOS PALSAR RTC
3D-EDIF	Informação tridimensional dos edifícios – orientação, perímetro e altura (shapefile – polígonos)	- - - -	PMJP OSM Google Earth Pro Google Earth Engine
ARVORE	Localização de árvores urbanas com dados sobre dimensões de copa e tronco (shapefile – pontos)	10,0 m -	ESRI 2020 Global LULC ESRI 2021 <i>basemap</i>
SOLO	Mapa de cobertura do solo com sete tipos de superfície, conforme classificação do UMEP (raster).	10,0 m -	ESRI 2020 Global LULC ESRI 2021 <i>basemap</i>

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para o manuseio dos dados no modelo UMEP, todos as informações espaciais foram reamostradas para uma resolução espacial de 10 m. Utilizou-se o Datum WGS 1984 e o sistema de coordenadas projetadas WGS 1984 UTM zone 25S como sistemas de referências das informações espaciais.

### **c. Informações meteorológicas**

As informações meteorológicas utilizadas no modelo UMEP foram extraídas a partir dos dados de saída das simulações realizadas no modelo WRF (Quadro 7). Devido a uma questão de poder de processamento computacional, inicialmente a produção dos mapas foi realizada por bairros e posteriormente agrupadas. Desse modo, para determinar o valor médio de cada atributo meteorológico por bairro utilizou-se a função *Zonal Statics* do software ArcGIS. Esta função calcula estatísticas sobre valores de um arquivo raster a partir de feições (zonas) de um arquivo shapefile. Os valores de todos os dados meteorológicos por bairro podem ser vistos no Apêndice 7.

Cabe ressaltar que outros atributos climáticos importantes para a estimativa da sensação térmica humana, como a radiação de ondas curtas difusa e direta, não estiveram disponíveis nas simulações do WRF. Contudo, há a opção de estimativa destas variáveis pelo modelo UMEP a partir da informação da radiação global ( $W/m^2$ ).

### **d. Procedimentos para o mapeamento da TRM (°C) e WSPEED (m/s) no UMEP**

O mapeamento dessas duas variáveis foi realizado em seis etapas, seguindo o roteiro definido por Lindberg et al. (2018), a saber:

Etapa 1 (Pré-Processador): Elaboração do Modelo Digital de Superfície (MDS) – este modelo contém informações de altimetria da superfície da cidade com base nos arquivos MDE e 3D-EDIF. Portanto, o modelo representa as variações em altura da topografia e das edificações de toda a cidade;

Etapa 2 (Pré-Processador): Elaboração dos Modelos Digitais de Superfície de Árvores – nesta etapa são utilizadas as informações dos arquivos MDE e ARVORES para elaborar dois modelos: o primeiro, chamado de *Canopy Digital Surface Model* (CDSM), agrupa as informações da altimetria da superfície e da volumetria das árvores; o segundo, chamado de *Trunk Digital Surface Model* (TDSM), contém informações de altimetria da superfície e da altura da copa das árvores.

Etapa 3 (Pré-Processador): Mapeamento do Fator de Visão de Céu (FVC) – a partir dos modelos elaborados nas etapas 1 e 2, o UMEP estimou o FVC das áreas urbanas de João Pessoa. O produto é um arquivo raster em que são demonstradas as áreas urbanas, em uma resolução de 10 m, classificadas segundo os valores de FVC que variam entre 0 e 1.

Etapa 4 (Pré-Processador): Elaboração dos Modelos de Geometria dos Edifícios – com o emprego dos dados dos arquivos MDS E 3D-EDIF, produziu-se dois arquivos raster contendo a informações da altura (m) e da orientação (graus), em relação ao Norte, respectivamente, de cada fachada dos edifícios. Estas informações são necessárias a estimativa da Trm (°C) da área de estudo;

Etapa 5 (Processador): Mapeamento da Temperatura radiante média (TRM, °C) – o plugin SOLWEIG foi utilizado para estimar as variações espaciais da TRM (°C) ao longo da área de estudo em uma escala de 10 m. Todos os dados espaciais das etapas anteriores foram utilizados para a estimativa da TRM (°C). Os parâmetros utilizados na modelagem, referente a características térmicas das superfícies (albedo e emissividade), absorção de radiação pelo corpo humano e postura humana, podem ser vistos no Quadro 9.

Etapa 6 (Processador). Mapeamento da velocidade do vento (WSPEED, m/s): para o mapeamento da velocidade do vento (m/s) em escala de 10 m utilizou-se o plugin URock. Foram empregadas informações espaciais das etapas 1, 2 e 4 como dados de entrada no plugin. Informações da velocidade dos ventos estão apresentados no Apêndice 7.

### **6.2.3. Abordagem biometeorológica humana**

#### **a. Mapeamento do PET (°C) da cidade de João Pessoa**

Com os mapas de TRM (°C) e de WSPEED (m/s), utilizou-se o módulo SpatialTC para mapear os valores de PET (°C) de cada bairro da cidade. Além das informações produzidas nas etapas 5 e 6, o plugin requer que sejam definidos parâmetros humanos da população local. Utilizou-se nesta pesquisa o trabalho de Andrade et al. (2016) como base para os parâmetros humanos necessários ao mapeamento do PET no modelo UMEP. O perfil predominante dos entrevistados utilizado como referência para os parâmetros humano foi: gênero masculino; altura média de 1,70m; peso de 69kg; idade de 36 anos; vestimenta 0,4 clo; e desenvolvendo atividade metabólica de 144W. Segundo Andrade et al. (2016), a maioria dos entrevistados (76%) estavam localizados à sombra. Todos os parâmetros de configuração aplicados no modelo UMEP estão sumarizados no Quadro 9.

Quadro 9 - Parâmetros de configuração utilizados no modelo UMEP.

Plugin	Parâmetros						
<b>SOLWEIG</b>	Albedo Solo	Albedo Parede	Emiss. Solo	Emiss. Parede	Ab. Roc Corpo	Ab. Rol Corpo	Postura Corpo
	0,20	0,20	0,90	0,95	0,7	0,95	Em pé
<b>URock</b>	Alt. Vel. Vento (m)	Velocidade Vento (m/s)	Direção Vento (°)	Resolução Vertical (m)	Resolução Horizontal (m)	Altura do dado de saída (m)	
	10,00	Estações INMET	Estações INMET	10,00	10,00	1,50	
<b>SpatialTC</b>	Idade (anos)	Metabolismo (W)	Vestimenta (clo)	Peso (Kg)	Altura (m)	Sexo da população	
	36	144	0,40	69	1,70	Masculino	

\* Ab. Roc Corpo = Absorção de radiação de onda curta pelo corpo humano; Ab. Rol Corpo = Absorção de radiação de onda longa pelo corpo humano.

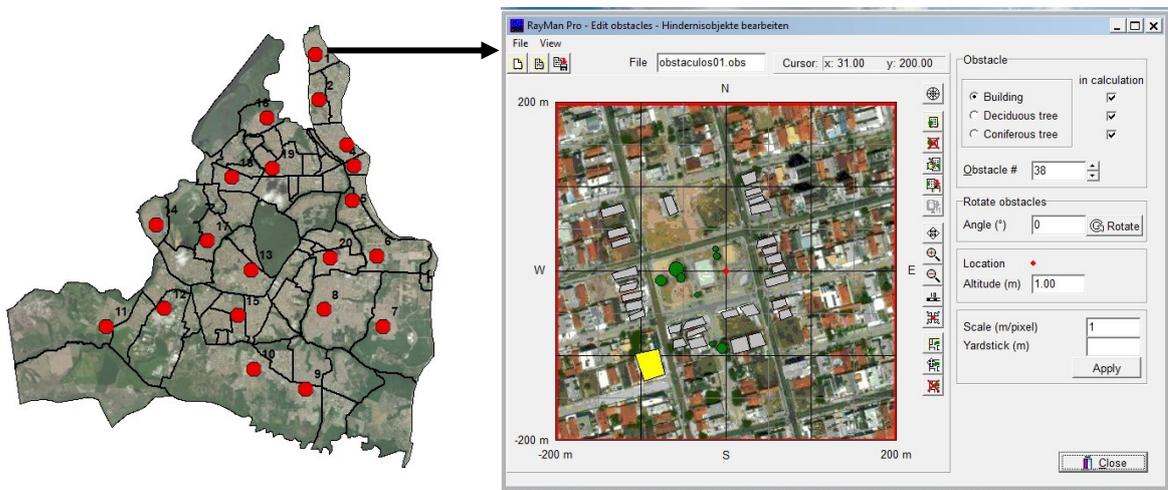
Fonte: Elaborado pelo Autor

### **b. Validação dos dados do mapa de PET (°C)**

A validação dos dados do mapa de PET (°C), obtidos com o plugin SpatialTC, foi realizada com base em modelagens no modelo microclimático Rayman Pro. Selecionou-se vinte pontos representativos da área urbana de JP e estimou-se os valores de PET (°C) no modelo Rayman Pro. Todos os parâmetros de configuração do Rayman foram os mesmos utilizados no modelo UMEP (dia e horário, localização, dados meteorológicos, parâmetros humanos e informações espaciais da área de entorno de cada ponto).

Na Figura 24 são apresentados os vinte pontos utilizados para estimativa do índice PET no modelo Rayman Pro e a tela de configuração dos parâmetros espaciais do ponto 01. Apenas os edifícios e árvores de entorno de cada pontos foram modelados no Rayman Pro. Com os resultados obtidos, realizou-se uma análise estética inferencial entre os dados do UMEP e do Rayman Pro.

Figura 24 – Representação dos pontos selecionados para cálculo no Rayman Pro e tela do modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor

### c. Análise estatística e exploratória espacial do índice PET (°C)

Para compreender a distribuição dos dados da modelagem do índice PET (°C) sobre a área de estudo, foram realizadas análises estatísticas e exploratórias espaciais. Adicionalmente, cinco parâmetros de superfície urbana (OKE et al., 2017, p. 21) da área de estudo foram selecionadas para análise estatística inferencial com o índice PET, a saber: o fator de visão de céu (FVC), a fração de área ocupada por edifícios (ÁREA); o valor médio da altura dos edifícios por pixel (ALTURA); o somatório do volume ocupado por edifícios por pixel (VOLUME) e a fração de vegetação (grama ou árvores) ocupada por pixel (VEGETACAO).

Inicialmente aplicou-se o coeficiente de correlação de Spearman para avaliar o grau de correlação entre as variáveis. Em seguida, buscou-se examinar e quantificar a relação entre o índice PET (variável dependente) e os demais parâmetros urbanos (variáveis independentes) com a aplicação da técnica Regressão Linear Simples, neste caso pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Esta análise foi realizada no software ArcMap, por meio da função *Exploratory Regression*.

Para uma melhor compreensão da distribuição das variáveis na área de estudo e a relação entre os resultados do índice PET (°C) e os parâmetros urbano, aplicou-se métodos de análise exploratória espacial (O'SULLIVAN & UNWIN, 2010). Para tanto, utilizou-se o método Índice Global de Moran. Este tipo de análise estima a magnitude

da autocorrelação espacial entre as diferentes sub-regiões de uma área de estudo, ao demonstrar que feições similares em localização também são similares em valores.

Para ampliar a compreensão climática urbana, utilizou-se o método de classificação de tipologias urbanas chamado *Local Climate Zones* (LCZ) (STEWART, OKE, 2012). Segundo Stewart e Oke (2012), o uso das LCZs na análise espacial ajuda a identificar áreas urbanas que possuem características semelhantes quanto ao uso e cobertura do solo e que são reconhecidas como relevantes do ponto de vista climático, por meio de seus balanços energético e hídrico. Desta forma, é possível avaliar o impacto de cada LCZ na variabilidade dos valores do PET ao longo do território. As LCZs foram determinadas segundo método proposto por Demuzere et al. (2021).

Por fim, com os dados de população da cidade de João Pessoa do Censo 2022, disponibilizados pelo IBGE (2023), pode-se estimar os valores absolutos e percentuais da população exposta ao estresse térmico do EV02, de acordo com a classificação de intervalos de conforto proposto por Andrade et al. (2016). Este estudo calibrou o índice PET (°C) para a cidade de Salvador, que apresenta características climáticas semelhantes à de João Pessoa. Cabe ressaltar que o universo populacional avaliado na pesquisa foi de 832467 pessoas, diferente da população total de 833932 habitantes do município, já que apenas a área urbana da cidade foi considerada.

## 7. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

### 7.1. ABORDAGEM METEOROLÓGICA

Nesta seção são apresentados os resultados da abordagem meteorológica da pesquisa, em que foram desenvolvidas as análises dos dados meteorológicos coletados, a caracterização das Ondas de Calor para o período de estudo e a modelagem numérica atmosférica de mesoescala realizada no modelo WRF.

#### 7.1.1. Imputação de dados não registrados pelas estações meteorológicas

Após a coleta e tratamento dos dados meteorológicos disponibilizados pelas estações locais do INMET e DECEA, observou-se que houve um significativo número de dados não registrados. Aplicou-se a técnica de imputação de dados média aritmética simples apenas para os dias em que a falta do registro do dado meteorológico permitiu a aplicação desta técnica, ou seja, o dia com informação faltante estava entre dois dias com dados disponibilizados. Períodos com mais de dois dias consecutivos sem registros das estações meteorológicas foram descartados.

Das três estações utilizadas, a convencional 82798 mostrou o menor número percentual de dados não registrados. Desta forma, esta estação foi utilizada para a elaboração da estatística descritiva dos dados meteorológicos. Na Tabela 5 é apresentado o número de dados diários não registrados em cada estação meteorológica.

Tabela 5 – Número de dados meteorológicos não registrados por estação meteorológica

Estação	Frequência Dados	Total Dados	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Prec. (mm)	Vvel. (m/s)	Vdir. (°)	Rad. (Kj/m <sup>2</sup> )	UR (%)
82798	<b>Diário</b>	5112	64	229	25	483	n/r	-	56
82800	<b>Diário</b>	5112	653	1215	1559	n/r	n/r	-	n/r
A320	<b>Diário</b>	5112	1076	1061	1425	1197	n/r	-	1018
	<b>Horário</b>	122688	-	-	-	-	-	30379	-

\* N/R = não registrado pela estação meteorológica.

#### 7.1.2. Estatística descritiva dos dados meteorológicos

A estatística descritiva dos dados meteorológicos indicou que a Tmax (°C) obteve média de 30,84 °C, que representa um aumento de 0,64 °C comparada à normal climatológica (30,2 °C). A Tmin (°C) apresentou um valor médio de 23,64 °C, 0,26

°C menor que o valor da normal climatológica (23,90 °C). Para o período de estudo, o valor máximo atingido pela Tmax (°C) foi de 34,30 °C e o valor máximo atingido pela Tmin (°C) foi de 29,10 °C. O 90° percentil de Tmax (°C) e de Tmin (°C) foi de 32,40 °C e de 26,20 °C, respectivamente.

A UR (%) obteve média de 76,66%, o que significa 0,46 ponto percentual superior ao da normal climatológica (76,20%). O valor máximo registrado para a UR (%) foi de 100% e o valor mínimo de 47,00%. O 90° percentil para este atributo meteorológico foi de 87,00%. A Vvel. (m/s) obteve valor médio de 2,31m/s, que comparado ao valor da normal climatológica do período (2,90m/s) mostra uma redução de 0,58m/s. A direção resultante média do vento para o período foi de 136,56°, uma leve alteração de 1,56° comparada a normal climatológica (135°).

Por fim, a radiação global obteve média de 864,84 KJ/m<sup>2</sup>, alcançando um valor máximo de 4884,31 KJ/m<sup>2</sup> em 05/08/2011. Não há a informação da radiação global no relatório das normais climatológicas para comparação com os dados coletados. Na Tabela 6 é apresentada a estatística descritiva de cada atributo climático.

Tabela 6 – Estatística descritiva dos atributos climáticos da série temporal.

<b>Tmax (°C)</b>		<b>Tmin (°C)</b>		<b>UR (%)</b>	
Média	30,84	Média	23,64	Média	76,66
Mediana	31,00	Mediana	23,70	Mediana	75,00
Moda	31,00	Moda	23,10	Moda	75,00
Desvio Padrão	1,40	Desvio Padrão	1,91	Desvio Padrão	7,07
Intervalo	10,90	Intervalo	11,90	Intervalo	53,00
Mínimo	23,40	Mínimo	17,20	Mínimo	47,00
Máximo	34,30	Máximo	29,10	Máximo	100,00
90° percentil	32,40	90° percentil	26,20	90° percentil	87,00
<b>Vvel. (m/s)</b>		<b>Vdir. (graus)</b>		<b>Rad. (Kj/m<sup>2</sup>)</b>	
Média	2,31	Média	136,56	Média	864,84
Mediana	2,40	Mediana	132,00	Mediana	41,70
Moda	2,63	Moda	136,00	Moda	-3,54
Desvio Padrão	0,85	Desvio Padrão	43,69	Desvio Padrão	1172,38
Intervalo	7,57	Intervalo	359,00	Intervalo	4893,07
Mínimo	0,00	Mínimo	1,00	Mínimo	-8,76
Máximo	7,57	Máximo	360,00	Máximo	4884,31

Fonte: Elaborado pelo autor.

O grau de correlação entre as variáveis foi avaliado a partir do coeficiente de correlação de Spearman, com grau de significância de 95% (Tabela 7). Como esperado, a variável Tmax (°C) tem correlação positiva moderada apenas com a Tmin (°C). Com os demais atributos, a correlação é negativa, porém com graus diferentes. Tmax (°C) tem correlação pequena com a Vvel. (m/s), correlação fraca com a precipitação e correlação moderada com a UR (%). A Tmin (°C) apresentou correlação negativa fraca com a precipitação, correlação nula com o vento e correlação negativa moderada com a UR (%). Precipitação mostrou uma correlação nula com a Vvel. (m/s) e uma correção positiva moderada com a UR. Por fim, a Vvel. (m/s) e a UR (%) mostraram uma correlação negativa pequena.

Tabela 7 – Matriz de correlação de Spearman

	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Precip. (mm)	Vvel. (m/s)	UR(%)
Tmax (°C)	<b>1.0</b>				
Tmin (°C)	0.6754852	<b>1.0</b>			
Prec.(mm)	-0.4122474	-0.4268357	<b>1.0</b>		
Vvel. (m/s)	-0.2487873	0.0384243	-0.1320484	<b>1.0</b>	
UR (%)	-0.5238147	-0.5633057	0.6680364	-0.2210059	<b>1.0</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise de possíveis tendências das variáveis Tmax (°C), Tmin (°C) , Vvel. (°C) e UR (°C) para o período de estudo foi avaliada com o teste de tendência de Mann-Kendall. Segundo as hipóteses e os critérios apresentados no Capítulo 6, Tmax (°C) e Urel (%) apresentaram tendência de crescimento para o período de estudo, enquanto Tmin (°C) e Vvel. (m/s) registraram tendência de decréscimo. No Quadro 10 são demonstradas as métricas do teste de tendência de Mann-Kendall.

Quadro 10 – Critérios do teste de Mann-Kendall para as variáveis avaliadas

Variável	Z	p-value	S	varS	Tau	Hipótese
Tmax (°C)	50249,00	0,00050	3662,00	530814,00	0,26	Crescimento
Tmin (°C)	-42064,00	0,02594	-2904,00	476286,00	-0,22	Decréscimo
Vento(m/s)	-87348,00	0,00000	-5413,00	383888,33	-0,49	Decréscimo
UR (%)	25393,00	0,01111	1852,00	531352,00	0,13	Crescimento

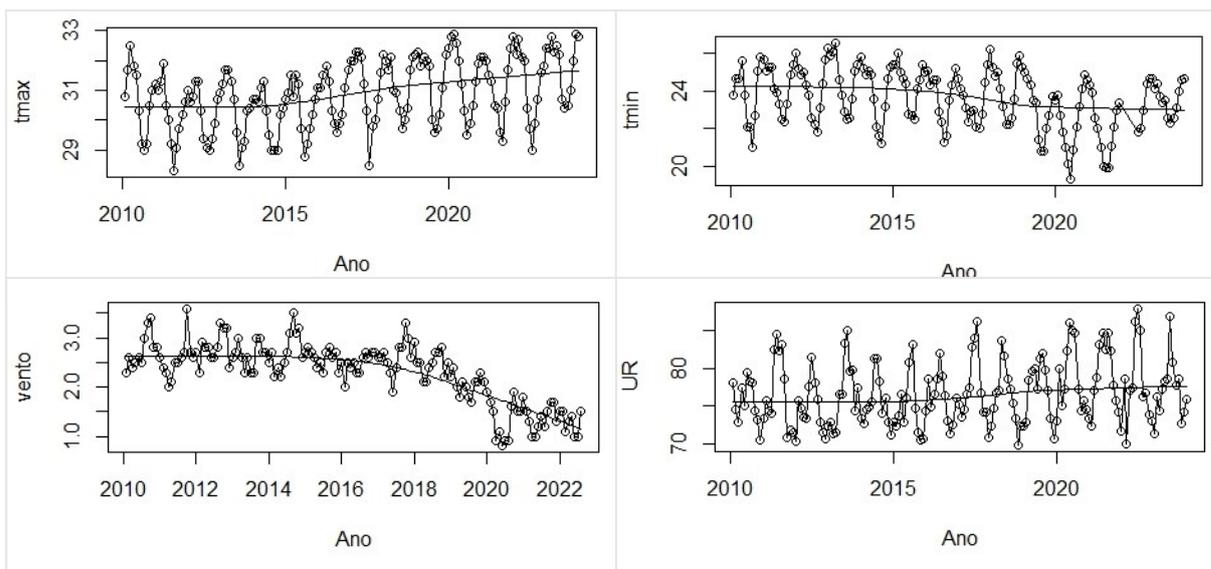
Fonte: Elaborado pelo autor

Observou-se que a Tmax (°C) iniciou uma tendência de crescimento a partir do ano 2015. A Tmax (°C) alcançou um valor médio de 30,35°C para o período de 2010 a

2015, enquanto o período de 2016 a 2023 obteve um valor médio de 31,25°C. Diferentemente da Tmax (°C), a Tmin (°C) registrou decréscimo a partir do ano de 2015. O período de 2010 a 2015 obteve um valor médio de 24,20°C para a Tmin (°C), enquanto o período de 2016 a 2023 obteve um valor médio de 23,19°C.

A Vvel. (m/s) mostrou uma significativa tendência de decréscimo, principalmente a partir do ano de 2017. Para o período de 2010 a 2016, a média da Vvel. (m/s) foi de 2,64 m/s. Para o período de 2017 a 2023, a média da Vvel. (m/s) foi de 1,88 m/s. Por fim, a UR (%) apresentou um leve crescimento a partir do ano de 2017, obtendo um valor médio de 75,87% para o período 2010 a 2017, e 77,67% para o período 2018 a 2023. Para uma melhor visualização do teste de Mann-Kendall foram elaborados gráficos de linha para os quatro parâmetros meteorológicos (Figura 25).

Figura 25 – Gráficos do teste Man-Kendall para Tmax (°C), Tmin (°C), Vvel. (m/s) e UR (%).



Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.1.3. Características das Ondas de Calor da cidade de João Pessoa

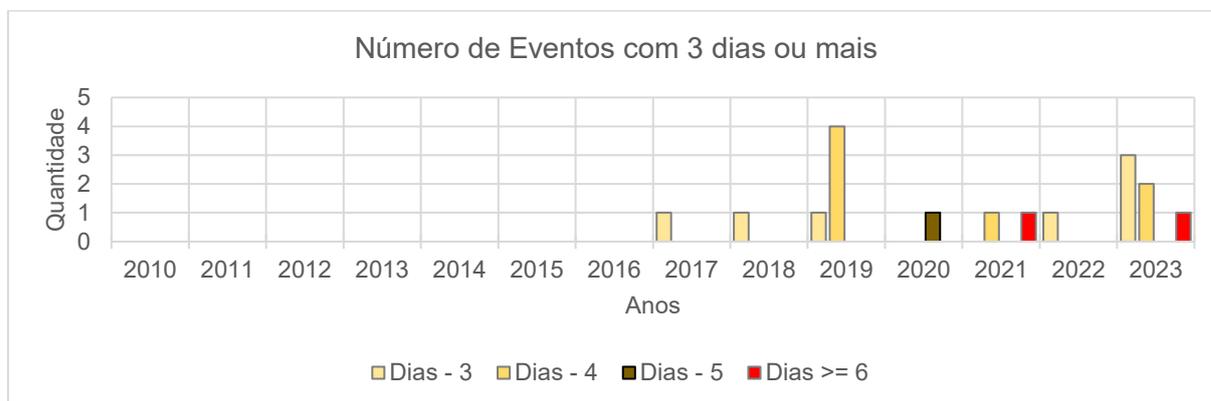
A seguir são apresentados os resultados dos estudos de ocorrência de OC na cidade de João Pessoa no período de 2010 a 2023, segundo os dados das três estações meteorológicas. Cabe lembrar que este estudo não tem o objetivo de realizar uma climatologia das OC, mas identificar episódios que viabilizem a análise da sensação térmica da população em um momento de calor extremo.

Na estação convencional 82798, um número total de 17 episódios de OC foi identificado. A duração dos episódios variou de 3 a 7 dias, com uma média de 4 dias. Em geral, os maiores valores de Tmax(°C) foram alcançados no primeiro dia do evento

e variaram de 32,40°C a 33,90°C, com valor médio de 33,20°C. A amplitude média (°C) dos eventos variou de 1,90°C a 1,15°C, com média de 1,49°C. As taxas de ascensão e de declínio apresentaram valores médios de 0,33°C/dia e 0,57°C/dia, respectivamente, o que indicam que, em geral, as OC não apresentaram um impacto severo na elevação da temperatura do ar.

Os anos com os maiores números de OC foram 2023, com 7 episódios, e 2019, com 5 episódios. Os meses com maiores número de eventos foram outubro, novembro, dezembro e janeiro, cada qual com três episódios. A estação primavera apresentou 9 episódios de OC, seguida do Verão com seis episódio. Contudo, a amplitude média (°C) do período do verão foi superior à primavera, com valores de 1,53°C e 1,46°C, respectivamente. Nos anos anteriores a 2016 não foram identificadas OC nesta estação meteorológica. No Gráfico 5 pode ser visto o número de eventos extremos com 3 dias ou mais por ano da estação convencional 82798.

Gráfico 5 – Número de eventos com 3 dias ou mais por ano na estação 82798.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na estação convencional 82800 (aeroporto) foram identificados 11 episódios de OC. A duração dos episódios variou de 3 a 6 dias, com uma média de 3,73 dias. Diferente da estação 82798, os maiores valores de Tmax (°C) foram alcançados no terceiro dia do evento e variaram de 31,30°C a 32,30°C, com valor médio de 31,96°C. A amplitude média (°C) dos eventos variou de 0,90°C a 1,54°C, com valor médio de 1,23°C. Foi registrado um valor médio de taxa de ascensão de 0,51°C/dia e um valor médio de taxa de declínio de 1,12°C/dia, o que indicam que, assim como na estação 82798, o impacto das OC no aumento da temperatura do ar não foi abrupto.

O ano com o maior número de OC foi 2019 com 3 episódios. O mês com maior número de eventos foi janeiro com 4 episódios. A estação verão apresentou 5 episódios de

OC, seguida do outono e primavera com três cada. A estação com maior amplitude média ( $^{\circ}\text{C}$ ) foi o Outono ( $1,38^{\circ}\text{C}$ ), seguida do verão ( $1,23^{\circ}\text{C}$ ). O número de eventos extremos com 3 dias ou mais por ano da estação convencional 82800 é sumarizado no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Número de eventos com 3 dias ou mais por ano na estação 82798.



Fonte: Elaborado pelo autor

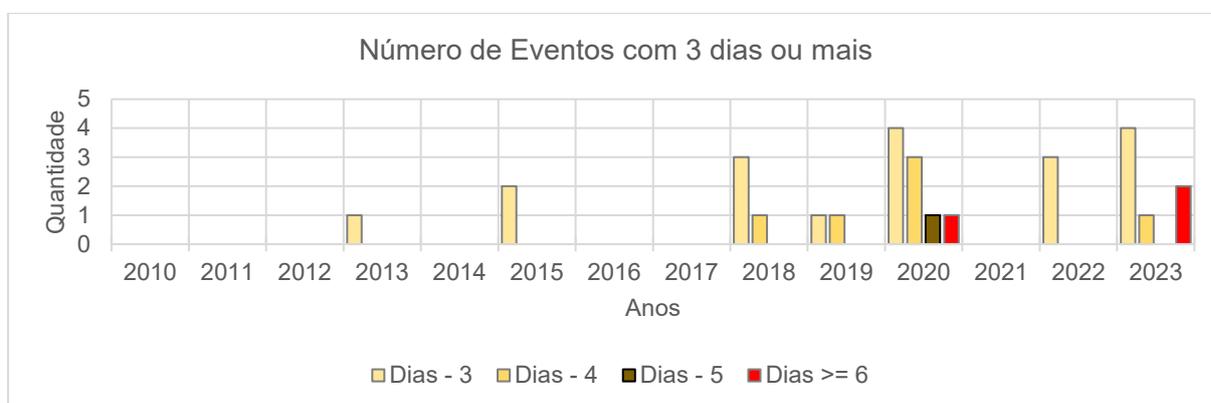
Na estação automática A320, identificou-se um número de 33 episódios de OC. A duração dos episódios variou de 3 a 9 dias, com uma média de 4 dias. Em geral, os maiores valores de  $T_{\text{max}}(^{\circ}\text{C})$  foram alcançados no terceiro dia do evento, e variaram de  $30,20^{\circ}\text{C}$  a  $33,90^{\circ}\text{C}$ , com valor médio de  $32,62^{\circ}\text{C}$ . A amplitude média ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos eventos variou de  $0,98^{\circ}\text{C}$  a  $2,00^{\circ}\text{C}$ , com valor médio de  $1,41^{\circ}\text{C}$ . Foi registrado um valor médio de taxa de ascensão de  $0,43^{\circ}\text{C}/\text{dia}$  e um valor médio de taxa de declínio de  $0,74^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ , o que indica baixo impacto do evento extremo de calor na elevação repentina da temperatura do ar.

Os anos com os maiores números de OC foram 2023, com 10 eventos, e 2020, com 9 eventos. Os meses com maior número de eventos foram outubro (08 episódios), janeiro (05 episódios) e abril (05 episódios). A estação primavera apresentou 14 episódios de Ondas de Calor, seguida do Verão com 11 episódio. A maior amplitude média ( $^{\circ}\text{C}$ ) foi registrada no período do verão com valor de  $1,57^{\circ}\text{C}$ , seguida do Outono com valor de  $1,41^{\circ}\text{C}$ . No Gráfico 7 pode ser visto o número de eventos extremos com 3 dias ou mais por ano da estação automática A320.

Com estes resultados é possível verificar que um número maior de OC é observado a partir do ano de 2017, nas três estações meteorológicas. O ano de 2023 contou com o maior número de OC registrados, totalizando 14 episódios. Nos meses de janeiro e

outubro observaram-se os maiores números de episódios com 12 e 11, respectivamente, e nas estações primavera e verão registraram-se os maiores números de eventos, com 26 e 22, respectivamente.

Gráfico 7 – Número de eventos com 3 dias ou mais por ano na estação A320.



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 7.1.4. Análise dos dados meteorológicos para os quatro estudos de caso

Nesta seção serão apresentados os resultados da análise dos dados meteorológicos durante as quatro OC selecionadas na seção 5 (EV01, EV02, EV03 e EV04). Na estação convencional 82798, os valores médios de Tmax (°C) nos períodos Pré-OC e Pós-OC foram sempre inferiores aos valores dos períodos DOC. Importante notar que todos os dias do período Pré-OC estiveram acima do limiar 90° percentil de Tmax (°C). A diferença entre os valores médios dos períodos DOC e Pós-OC variou entre 0,39°C e 2,75°C nos quatro eventos, o que sugere que nos dias Pós-OC há uma redução da Tmax (°C) abaixo do limiar 90° percentil (dos oito dias avaliados, apenas um esteve com valor de Tmax (°C) superior ao limiar).

Quanto à precipitação total acumulada (mm), registrou-se os mais altos valores no período Pós-OC, variando de 3,50 a 8,90mm. No evento EV04, houve um registro no período Pré-OC de 1,13mm, o maior valor entre os demais eventos para o período. A variável UR (%) obteve os menores valores durante o período DOC e os maiores valores em períodos Pós-OC, fruto de precipitações registradas neste período. A diferença dos valores dos períodos Pós-OC e DOC variou de 1,48 mm a 20,75 mm.

Para a variável velocidade do vento (m/s), os dados sugerem que não há variações significativas que possam estar correlacionados às OC analisadas. Ademais, a velocidade do vento (m/s) foi registrada em apenas em três eventos. Na Tabela 8 são

apresentados os valores médios dos dados meteorológicos da estação convencional 82798 por período.

Tabela 8 – Médias dos dados meteorológicos por período de evento da estação 82798

<b>Evento</b>	<b>Período</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>Precipitação (mm)</b>	<b>Vvel. (m/s)</b>	<b>UR (%)</b>
<b>EV01</b> <b>07/01/19</b>	<b>Pré-OC</b>	32,77	0,00	2,39	70,33
	<b>DOC</b>	32,85	0,00	2,58	69,06
	<b>Pós-OC</b>	30,20	3,50	2,67	77,25
<b>EV02</b> <b>11/04/20</b>	<b>Pré-OC</b>	33,00	0,07	0,99	75,75
	<b>DOC</b>	33,35	0,33	1,65	71,00
	<b>Pós-OC</b>	30,60	8,90	0,30	91,75
<b>EV03</b> <b>30/11/21</b>	<b>Pré-OC</b>	32,60	0,20	1,29	75,00
	<b>DOC</b>	33,14	0,20	1,32	72,14
	<b>Pós-OC</b>	32,75	5,60	1,54	73,63
<b>EV04</b> <b>11/03/23</b>	<b>Pré-OC</b>	32,83	1,13	Sem coleta	74,00
	<b>DOC</b>	33,55	0,00	Sem coleta	72,44
	<b>Pós-OC</b>	31,60	0,00	Sem coleta	81,38

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados da estação 82800 mostraram um comportamento similar ao das variáveis da estação 82798 (Tabela 9). Ressalta-se que o evento EV04 não foi identificado nesta estação meteorológica. Os valores de Tmax (°C) nos períodos Pré-OC e Pós-OC foram sempre inferiores aos valores do período DOC. A diferença entre os valores de Pré-OC e DOC variou entre 0,10°C e 0,96°C. Todos os dias do período Pré-OC estiveram acima do limiar 90° percentil desta estação. A diferença entre os valores dos períodos DOC e Pós-OC variou entre 0,30°C e 4,00°C, o que também sugere que nos dias Pós-OC há uma redução da Tmax (°C) abaixo do seu limiar 90° percentil.

Para a variável precipitação (mm), a estação coletou dados apenas para os eventos EV01 e EV03. Contudo, no EV01 foi registrado um valor médio de precipitação (mm) de 1,7 mm no período DOC. A variável UR (%) obteve os menores valores médios no período DOC e os maiores valores médios em períodos Pós-OC. A diferença dos valores dos períodos Pós-OC e DOC variou de 3,33% a 28,67% pontos percentuais. Por fim, a velocidade do vento (m/s), tal como na estação 82798, não apresentou variações significativas que associem uma mudança do comportamento do vento aos eventos analisados.

Tabela 9 – Média dos dados meteorológicos por período de evento da estação 82800

<b>Evento</b>	<b>Período</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>Precipitação (mm)</b>	<b>Vvel. (m/s)</b>	<b>UR (%)</b>
<b>EV01</b> <b>07/01/19</b>	<b>Pré-OC</b>	31,14	0,00	13,00	58,20
	<b>OC</b>	32,10	1,07	14,00	49,33
	<b>Pós-OC</b>	28,10	0,00	13,00	78,00
<b>EV02</b> <b>11/04/20</b>	<b>Pré-OC</b>	31,53	-	4,88	66,50
	<b>OC</b>	31,97	-	5,13	61,67
	<b>Pós-OC</b>	29,00	-	2,35	87,00
<b>EV03</b> <b>30/11/21</b>	<b>Pré-OC</b>	31,40	0,00	5,30	64,33
	<b>OC</b>	31,50	0,00	4,93	61,67
	<b>Pós-OC</b>	31,20	0,00	5,88	65,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, a estação automática A320 registrou um comportamento similar dos parâmetros meteorológicos ao das estações anteriores nos três períodos dos quatro eventos. Quanto à radiação global ( $\text{Kj/m}^2$ ), os maiores valores foram registrados no período DOC, a exceção do evento EV03, que apresentou o maior valor deste atributo no período Pré-OC. Contudo, os menores valores foram registrados em períodos Pós-OC, devido ao aumento da nebulosidade que promoveu leve precipitação na forma de chuva. A redução dos valores de radiação global ( $\text{Kj/m}^2$ ) entre os períodos DOC e Pós-OC variou entre  $152,77 \text{ KJ/m}^2$  a  $1220,74 \text{ KJ/m}^2$ . Os dados médios das variáveis meteorológicas da estação automática A320 podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 – Média das variáveis meteorológicas por período de evento da estação A320

<b>Evento</b>	<b>Período</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>Prec. (mm)</b>	<b>Vento (m/s)</b>	<b>UR (%)</b>	<b>Radiação (KJ/m<sup>2</sup>)</b>
<b>EV01</b> <b>07/01/19</b>	<b>Pré-OC</b>	31,88	0,00	2,98	63,25	2741,44
	<b>OC</b>	32,47	0,00	2,83	56,67	3128,61
	<b>Pós-OC</b>	28,55	0,00	2,75	71,00	2237,36
<b>EV02</b> <b>11/04/20</b>	<b>Pré-OC</b>	32,27	0,00	1,33	59,67	3112,50
	<b>OC</b>	32,75	0,00	1,50	58,25	3193,92
	<b>Pós-OC</b>	30,20	0,00	1,40	73,00	2436,41
<b>EV03</b> <b>30/11/21</b>	<b>Pré-OC</b>	32,20	0,00	1,70	59,00	3181,55
	<b>OC</b>	32,78	0,00	1,70	54,60	3072,75
	<b>Pós-OC</b>	31,10	0,00	1,90	60,00	2919,98
<b>EV04</b> <b>11/03/23</b>	<b>Pré-OC</b>	32,20	0,00	1,60	59,00	3005,73
	<b>OC</b>	33,02	0,04	1,46	53,20	3137,04
	<b>Pós-OC</b>	30,60	0,30	1,00	70,00	1916,30

### 7.1.5. Validação dos resultados modelo WRF

Nesta seção serão apresentados os resultados da validação das simulações numéricas dos eventos EV01, EV02 e EV04. O EV03 não foi modelado devido ao elevado número de dias da OC. Após os resultados da validação dos dados de saída do modelo, serão apresentadas a análise horizontal dos dados meteorológicos modelados em um momento de calor extremo do evento EV02.

As simulações foram testados com base nas recomendações de Emery et al. (2001). Para facilitar a compreensão dos resultados são demonstrados quadros com informações de cada validação por evento, em que contêm os índices estatísticos, os respectivos *benchmarks* e os resultados dos cálculos. Os valores que não estiveram dentro dos *benchmarks* foram destacados em vermelho. No Apêndice 6 podem ser vistos todos os resultados detalhados da validação do modelo.

De uma maneira geral, observou-se que o modelo WRF apresentou diferentes performances entre os três estudos de caso, tanto na acurácia dos resultados quanto na reprodução da variabilidade dos valores diários das três variáveis ao longo dos períodos de análise. Para a variável temperatura do ar a 2 m (T2, °C), o conjunto de esquemas de parametrização S1 (esquema YSU) apresentou menores vieses médios. Para a variável umidade relativa do ar (rh2), tanto o conjunto S1 quanto o conjunto S2 (esquema Boulac) mostraram-se adequados para a reprodução deste dado meteorológico. Nenhum dos dois esquemas mostrou-se apropriado para reproduzir a variável velocidade do vento (WSP10, m/s). A seguir são descritas as validações das simulações de acordo com o conjunto de esquemas de parametrizações empregados.

#### b. Conjunto de esquemas S1 (esquema YSU)

Para a T2 (°C), o EV01 obteve MB = -0,40; MAGE = 1,50; e IOA = +0,71; o EV02 obteve MB = -0,50 ; MAGE = 1,56; e IOA = +0,75; e o EV04 obteve MB = -1,13; MAGE = 2,00; e IOA = +0,63. Para o IOA, o WRF obteve a melhor concordância dos dados modelados com o evento EV02, porém pouco abaixo do benchmark. Nota-se uma subestimação da T2 (°C) pelo modelo, que pode ser explicada pela proximidade de duas estações meteorológicas (82798 e A320) ao oceano. Segundo KITAGAWA et al. (2018), em regiões próximas a orla marítima, o modelo WRF considera o oceano como a categoria dominante em detrimento dos diferentes tipos de uso e cobertura do solo.

Dessa forma, o alto valor de capacidade térmica dos oceanos é atribuído para ser o representativo na grade de 1 x 1 km, o que reduz os valores e flutuações de T2 (°C).

Quanto à rh2 (%), os resultados estatísticos também mostram uma boa simulação do modelo WRF. Os vieses médios negativos (MB e MAGE) estiveram dentro dos limites aceitáveis e indicam uma subestimação do modelo, especialmente para o evento EV02. À exceção do EV02, o IOA teve os seus resultados estatísticos dentro dos benchmarks. Para a rh2 (%), o evento EV01 obteve MB = -1,42; MAGE = 7,31; e IOA = 0,79; o evento EV02 obteve MB = -9,22; MAGE = 12,83; e IOA = 0,51; e o evento EV04 obteve MB = -3,93; MAGE = 6,60; e IOA = 0,74.

Os resultados estatísticos da simulação para a variável WSP10 (m/s) estiveram fora dos *benchmarks*. Os vieses médios positivos indicam uma subestimação do modelo e uma baixa acurácia na reprodução desta variável. Para a WSP10, o evento EV01 obteve MB = +1,40 e RMSE = 4,66 e o evento EV02 teve MB = +2,21 e RMSE = 2,96. Não houve coleta em uma estação do evento EV04. Na Tabela 11 são apresentados os resultados estatísticos de cada evento com a aplicação do conjunto S1.

Tabela 11 – Resultados estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s) do conjunto S1

T2 (°C)				
Índice	Benchmark	Eventos		
		EV01	EV02	EV04
MB (°C)	≤± 0,50	-0,40	-0,50	<b>-1,13</b>
MAGE (°C)	≤ 2,00	1,50	1,56	2,00
IOA	≥ 0,80	<b>0,71</b>	<b>0,75</b>	<b>0,63</b>
rh2 (%)				
Índice	Benchmark	Eventos		
		EV01	EV02	EV04
MB (%)	< ±10,00	-1,42	-9,22	-3,93
MAGE (%)	< 20,00	7,31	12,83	6,60
IOA	≥ 0,60	0,79	<b>0,51</b>	0,74
WSP10 (m/s)				
Índice	Benchmark	Eventos		
		EV01	EV02	EV04*
MB (m/s)	≤± 0,50	<b>1,40</b>	<b>2,21</b>	-
RMSE (m/s)	≤ 2,00	<b>4,66</b>	<b>2,96</b>	-

\* Não houve coleta de dados na estação convencional 82798

## b. Conjunto de esquemas S2

Para a T2 (°C), o EV01 teve MB = -1,04; MAGE = 1,76; e IOA = +0,60; o EV02 teve MB = -0,55 ; MAGE = 1,61; e IOA = +0,70; e o EV04 teve MB = -1,04; MAGE = 1,76; e IOA = +0,60. Estes resultados mostram uma subestimação de T2 (°C) pelo modelo, representado pelos valores negativos de MB e superiores aos observados com o conjunto de esquemas S1.

Quanto à rh2 (%), os resultados estatísticos mostram uma satisfatória simulação do modelo WRF. Todos os vieses médios (MB e MAGE) estiveram dentro dos limites aceitáveis, com uma leve superestimação nos eventos EV01 e EV02 e leve subestimação no evento EV04. À exceção do EV01, o IOA teve os seus resultados estatísticos dentro dos benchmarks, o que indica uma boa concordância entre os valores modelados e observados. Para a rh2 (%), o evento EV01 obteve MB = +2,76; MAGE = 11,08; e IOA = 0,51; o evento EV02 obteve MB = +1,10; MAGE = 7,66; e IOA = 0,72; e o evento EV04 obteve MB = -2,28; MAGE = 7,68; e IOA = 0,70. Bussoni et al. (2022) ressaltam que embora possa haver uma percepção de erro elevado, a umidade relativa (%) é uma variável de difícil representação pelos modelos. No caso do WRF, esta variável é obtida a partir de valores de temperatura e pressão e, portanto, um erro de aproximadamente 20% mostra-se satisfatório em uma primeira análise.

Por fim, os resultados estatísticos de WSP10 mostram uma superestimação da variável (valores positivos de MB). Para a WSP10, o evento EV01 teve MB = +1,52 e RMSE = 4,33 e o evento EV02 teve MB = +2,01 e RMSE = 2,68. Como uma das estações não registrou dados para o evento EV04, não foi possível a apresentação dos resultados. Segundo vários estudos, a variável WSP10 é uma variável de difícil reprodutibilidade nos modelos numéricos, em parte pelo uso de dados de condição inicial e de contorno, pela escolha das parametrizações, pelo recorte temporal e pelas características topográficas do local (SILVA e FISCH, 2014; SOUZA et al., 2022; KITAGAWA ET AL., 2022).

Dentre todos os resultados das três variáveis, nota-se que o evento EV02 obteve os menores vieses médios entre os três casos (a exceção do índice MB para a variável WSP10), com valores dentro ou mais próximos dos limites aceitáveis. É difícil encontrar um motivo para este fato, visto que os resultados do WRF também são dependentes da precisão e acurácia dos arquivos meteorológicos de entrada (*initial* e

*boundary conditions*). Na Tabela 12 são apresentados os resultados estatísticos de cada evento do conjunto de esquemas S2.

Tabela 12 – Resultados estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s) do conjunto S2

T2 (°C)				
Índice	Benchmark	Evento		
		EV01	EV02	EV04
MB (°C)	≤ ±0,50	<b>-1,01</b>	<b>-0,55</b>	<b>-0,95</b>
MAGE (°C)	≤ 2,00	1,76	1,61	1,81
IOA	≥ 0,80	<b>0,60</b>	<b>0,70</b>	<b>0,58</b>
rh2 (%)				
Índice	Benchmark	Evento		
		EV01	EV02	EV04
MB (%)	< ±10,00	2,76	1,10	-2,28
MAGE (%)	< 20,00	11,08	7,66	7,68
IOA	≥ 0,60	<b>0,51</b>	0,72	0,70
WSP10 (m/s)				
Índice	Benchmark	Evento		
		EV01	EV02	EV04*
MB (m/s)	≤± 0,50	<b>1,52</b>	<b>2,01</b>	-
RMSE (m/s)	≤ 2,00	<b>4,33</b>	<b>2,68</b>	-

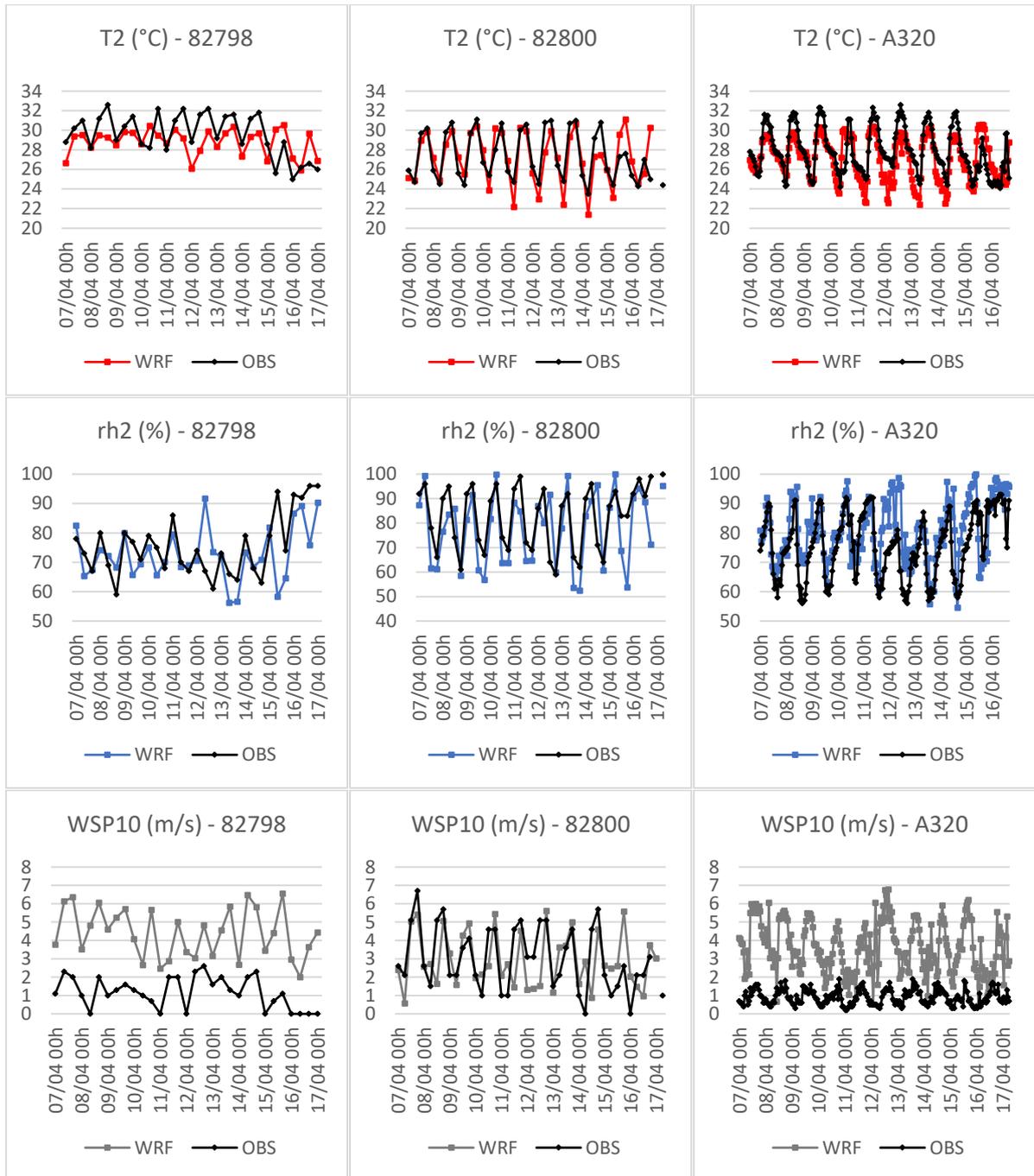
\* Não houve registro de dados na estação convencional 82798

Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 7.1.6. Variação diária dos dados modelados pelo WRF do EV02

A seguir serão apresentadas a variabilidade diária dos dados meteorológicos utilizados na validação do modelo WRF. Neste caso, serão demonstrados os resultados da simulação da variável T2 (°C) com o conjunto S1 e a simulação da variável rh2 (%) com o conjunto S2, ambas do evento EV02 (11/04 a 14/04/2020), que foi melhor reproduzido pelo modelo WRF. Apesar da baixa acurácia do modelo quanto à variável WSP10 (m/s), serão demonstrados os resultados do conjunto de esquemas S2 para o evento EV02. As plotagens com as séries temporais comparando a variação diária de T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s) para cada estação meteorológica utilizada neste estudo podem ser vistas na Figura 26.

Figura 26 – Variação diária de T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s) modelado (WRF) e observado (OBS) para o evento EV02 por estação meteorológica.



Fonte: Elaborado pelo Autor

De uma forma geral, o WRF reproduziu bem as flutuações diárias da variável T2 (°C) das três estações meteorológicas utilizadas nesta pesquisa, principalmente nos oito primeiros dias do evento EV02 (Figura 26a). Nos dois dias finais, onde houve um registro de redução da temperatura do ar observada, o WRF não acompanhou esta diminuição e manteve os valores médios dos dias anteriores. Observa-se que para a estação 82798, localizada próximo à orla marítima, o modelo não conseguiu

acompanhar tão bem os picos de temperatura, diferentemente da estação 82800 e A320.

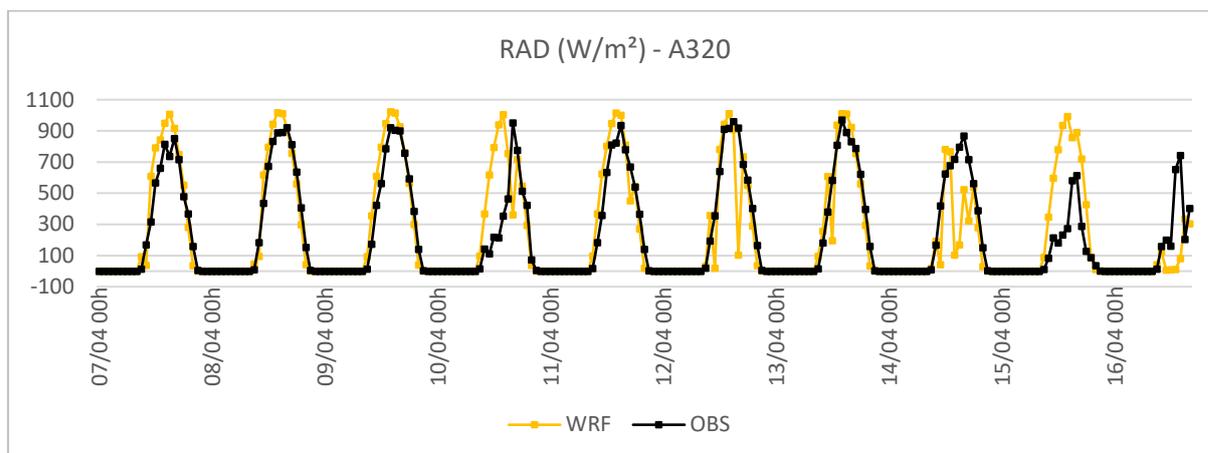
Quanto a  $rh_2$  (%), o modelo acompanhou as flutuações diárias da variável registradas nas três estações, com uma subestimação da variável observada nas estações 82798 e 82800 e uma superestimação na estação A320 (Figura 26b). Esta última estação, além de próxima ao oceano, está inserida em região com maior presença de áreas verdes, em que se registram maiores valores de fluxos turbulentos de calor latente, o que pode ter contribuído com a superestimação da  $rh_2$  (%). Apesar destes comportamentos médios de  $rh_2$  (%) em cada estação, houve dias com grandes vieses positivos, principalmente nas estações 82798 e A320 (dia 12/04, por exemplo).

Os resultados estatísticos da modelagem da variável WSP10 (m/s) são confirmados pela dificuldade do modelo WRF em reproduzir as flutuações diárias da variável (Figura 26c). Apesar disso, o modelo mostrou uma razoável reprodução dos dados observados pela estação 82800 (aeroporto). Atribui-se este resultado ao fato desta estação estar localizada no aeroporto e livre de obstruções urbanas, o que permite maiores velocidades dos ventos. Para as duas outras estações meteorológicas, o WRF superestimou os valores desta variável.

Adicionalmente, a variação diária da radiação solar global ( $W/m^2$ ) também foi avaliada. Apenas a estação automática A320 coleta dados desta variável, logo foi a única que pode ter os dados comparados com os simulados pelo WRF. O modelo conseguiu reproduzir satisfatoriamente as variações horárias da RAD ( $W/m^2$ ), contudo notam-se maiores discrepâncias nos dois últimos dias de simulação (Figura 27). Como informado anteriormente, este período caracterizou-se pelo aumento da nebulosidade e presença de precipitação, que pode ter impactado os resultados do modelo. Segundo Ávila et al. (2020), os esquemas de radiação do WRF (como o RRMTG utilizado nesta pesquisa) são altamente sensíveis a cobertura de nuvens estimadas pelo modelo, com isso os menores vieses são, geralmente, obtidos em períodos de céu claro e limpo.

Em termos de acurácia da modelagem, o viés positivo de MB (+18,89) e a magnitude média de RMSE ( $189,46 W/m^2$ ) indicam uma superestimação do modelo. Obteve-se um valor do coeficiente de correção de Pearson disso de 0,85, o que indica uma correlação positiva forte entre os dados modelados e observados.

Figura 27 – Variação diária da RAD ( $\text{W/m}^2$ ) modelado (WRF) e observado (OBS).



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 7.1.7. Análise horizontal dos dados modelados pelo WRF do EV02

Nesta seção serão demonstrados a análise horizontal das variáveis  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $rh_2$  (%) e RAD ( $\text{W/m}^2$ ), com ênfase nos valores médios por bairros. Uma vez que o modelo UMEP também se utiliza de informações dos fluxos turbulentos de calor sensível ( $\text{W/m}^2$ ) e calor latente ( $\text{W/m}^2$ ) para a modelagem da temperatura radiante média (TRM) em ambientes urbanos, informações destas duas últimas variáveis foram extraídas do WRF e serão apresentadas. A análise destas cinco variáveis refere-se ao dia 13/04/2023 às 16h UTC, em que o modelo WRF mostrou os menores vieses médios para  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $rh_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) nos dias de OC.

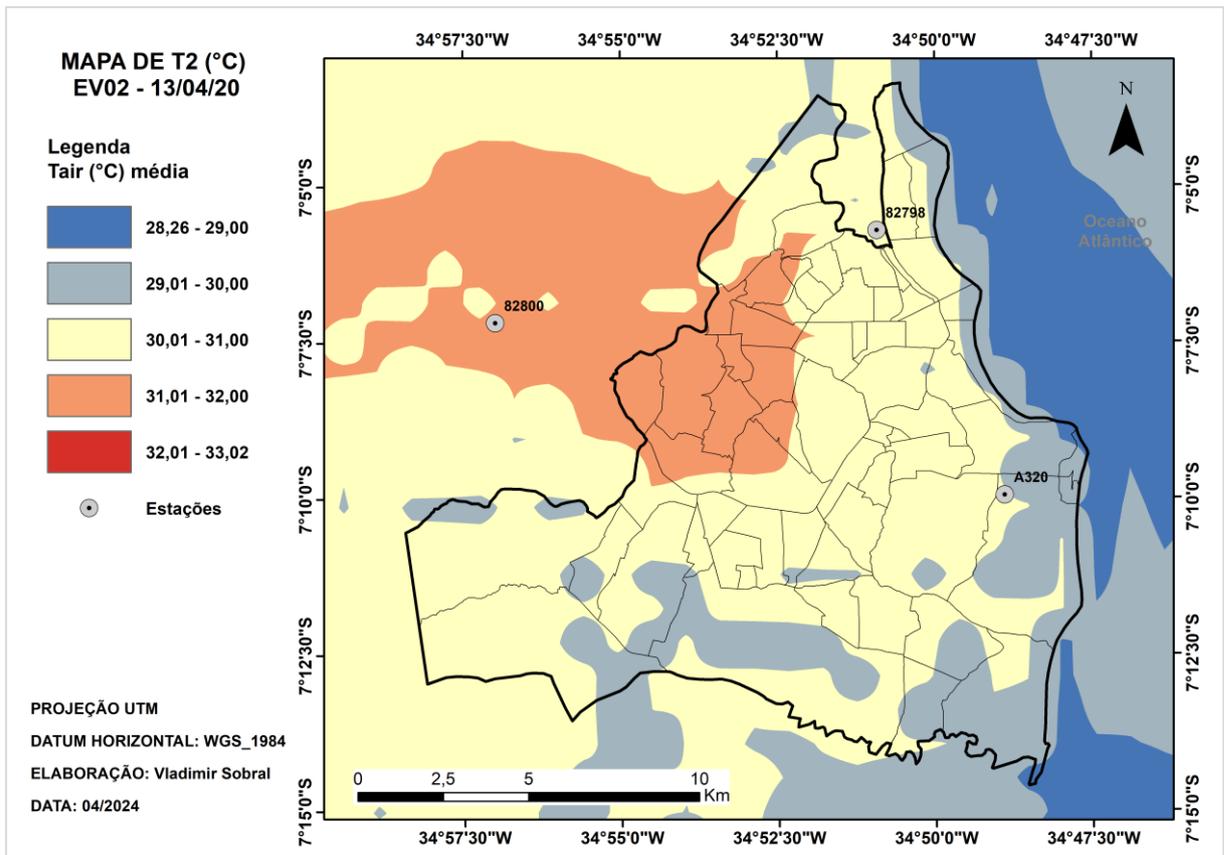
#### b. Temperatura do ar ( $T_2$ , $^{\circ}\text{C}$ ) a 2 m

Observou-se que a  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) apresentou uma amplitude térmica de  $2,29^{\circ}\text{C}$  dentro dos limites da cidade (Figura 28). Os menores valores médios foram obtidos em regiões contíguas à orla marítima, influenciadas pela proximidade com o oceano, e regiões ao sul da cidade, caracterizados pela maior presença de vegetação. Devido ao vento predominante de sudeste ( $138^{\circ}\text{C}$ ), os maiores valores médios foram registrados na região noroeste da cidade, resultado do ar aquecido pelo fluxo de calor sensível proveniente de outros bairros e de efeitos térmicos locais (região com elevado adensamento e pouca vegetação).

Entre os bairros, as mudanças de tipo de uso e cobertura do solo, além dos diferentes graus de adensamento e de verticalização, não foram capazes de influenciar a elevação/redução da  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) próximo à superfície em mais de  $1,00^{\circ}\text{C}$ . Apesar da baixa diferença térmica entre estas regiões, ainda é possível notar que alguns bairros com

elevado grau de adensamento e verticalização, a exemplo de Manaíra, apresentaram valores médios de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) levemente superiores aos de bairros vizinhos (Manaíra –  $30,33^{\circ}\text{C}$ ; Tambaú –  $30,05^{\circ}\text{C}$  e Jardim Oceania –  $30,13^{\circ}\text{C}$ ). De modo contrário, a Mata do Buraquinho, localizada no centro geográfico da cidade, obteve um valor médio de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) levemente inferior ao de bairros circundantes (Mata do Buraquinho –  $30,56^{\circ}\text{C}$ ; Bancários –  $30,64^{\circ}\text{C}$  e Jaguaribe –  $31,14^{\circ}\text{C}$ ).

Figura 28 – Mapa de T2 ( $^{\circ}\text{C}$ ) para o dia 13/04/20 às 16h UTC.



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta baixa variação térmica entre áreas urbanas de uma mesma cidade é algo indicado na literatura clássica. Em período diurno e em condições de uma atmosfera calma e limpa, a temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) não sofre variações significativas, estando mais suscetíveis a atuação do transporte horizontal de calor (STEWART e MILLS, 2021). O comportamento térmico de bairros da cidade de João Pessoa foi descrito por Santos (2011), que avaliou a formação de UHI na cidade. O autor constatou que os valores médios da temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) em oito pontos de coleta de dados meteorológicos distribuídos pela área urbana de João Pessoa variaram de  $27,20^{\circ}\text{C}$  a  $28,70^{\circ}\text{C}$ , no período de 02/02/2011 a 02/03/2011.

Ao se comparar os resultados de Santos (2011) com os valores médios de T2 (°C) obtidos dos 11 dias de simulação do modelo WRF (07/04/2020 a 17/04/2020), observa-se um padrão semelhante nos pontos observados (Tabela 13). O ponto 01, representado pela reserva florestal Mata do Buraquinho, obteve o menor registro de temperatura do ar entre todos os pontos, enquanto os pontos P03 e P04, representado pelos bairros Manaíra e Cabo Branco, registraram os maiores valores.

Tabela 13 – Comparativo entre os valores de T2 (°C) modelados (A) e de Santos (2011) (B).

Pontos	Bairros	Tar (°C) média e DP* (A)	Tar (%) min e máx (A)	Tar (°C) média e DP* (B)	Tar (%) min e máx (B)
P01	M. Buraquinho	26,95 ± 2,12	21,59 e 30,65	27,20 ± 2,41	24,10 e 28,60
P02	Expedicionários	27,41 ± 2,22	21,91 e 31,33	27,70 ± 2,00	24,30 e 28,90
P03	Manaíra	27,75 ± 1,85	22,15 e 31,01	28,70 ± 2,10	24,90 e 27,80
P04	Cabo Branco	27,68 ± 1,80	22,47 e 30,96	28,30 ± 2,10	24,70 e 29,60
P05	Mangabeira	27,24 ± 2,17	22,76 e 30,68	27,70 ± 2,10	24,40 e 28,80
P06	Cruz das Armas	27,40 ± 2,48	21,48 e 31,50	27,70 ± 2,50	24,20 e 29,10
P07	Alto dos Mateus	27,13 ± 2,82	21,47 e 31,81	27,70 ± 2,60	24,30 e 29,00
P08	Centro	27,09 ± 2,68	22,13 e 31,51	27,70 ± 2,00	22,70 e 27,20
P09	Bancários	27,38 ± 2,17	21,88 e 31,21	28,20 ± 2,30	24,40 e 29,00

\*DP = Desvio padrão

Fonte: Elaborado pelo autor

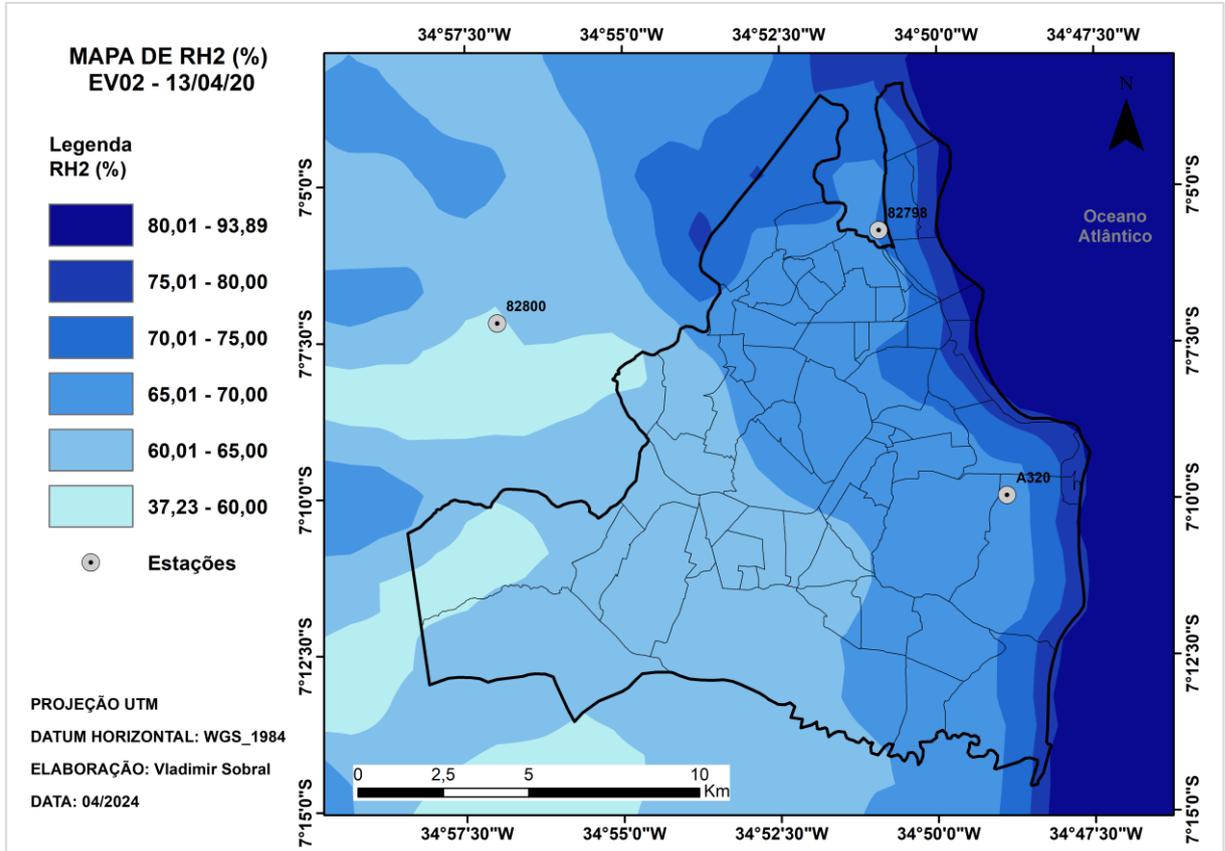
#### b. Umidade relativa do ar (rh2, %) a 2 m

Na Figura 29 pode ser visto a distribuição espacial de rh2 (%) com base na simulação do modelo WRF para o dia 13/04/2020 às 16h UTC. Observa-se que de modo contrário a T2 (°C), os maiores valores médios de rh2 (%) são registrados em bairros localizados na orla marítima da cidade, entre eles Tambaú (79,31 %), Cabo Branco (79,09 %) e Ponta do Seixas (78,87 %). Com o aumento da distância em relação ao oceano, o modelo WRF indica uma redução de rh2 (%), principalmente em bairros situados a sudoeste da cidade, entre eles Mumbaba (60,10 %), Alto dos Mateus (60,72 %) e Indústrias (61,06 %). O gradiente de umidade dentro dos limites da cidade foi de 19,21 pontos percentuais.

O modelo WRF também indica uma elevada umidade relativa do ar na região noroeste da cidade, influenciada pelo Rio Sanhauá e seus afluentes. Outros corpos d'água de pequena extensão territorial, a exemplo da Lagoa do Parque Solon de Lucena, dos

rios Jaguaribe e Gramame e das três Lagoas (Figura 18), não foram representativos nos resultados do modelo.

Figura 29 – Mapa de rh2 (%) para o dia 13/04/20 às 16h UTC.



Fonte: Elaborado pelo autor

Além da coleta de dados de temperatura do ar, Santos (2011) também obteve os valores de umidade relativa do ar em oito pontos distribuídos ao longo da cidade de João Pessoa. O autor constatou que os valores médios de umidade relativa do ar (%) variaram de 75,10 % a 81,30 %, no período de 02/02/2011 a 02/03/2011. Assim como na análise de T2 (°C), os valores registrados por Santos (2011) foram comparados aos dos dados obtidos pelo modelo WRF e constatou-se uma similaridade entre as duas informações (Tabela 14).

Os maiores valores médios foram registrados na reserva Florestal Mata do Buraquinho, tanto por Santos (2011) quanto pelo modelo WRF (81,30 % e 76,13 %, respectivamente). Os bairros com menores valores de umidade relativa do ar são diferentes, mas com valores próximos. Como exemplo, o bairro Bancários obteve 75,10 % de UR (%) na pesquisa de Santos (2011) e 74,34 % de rh2 (%) nos resultados do modelo WRF.

Tabela 14 – Comparativo entre valores de rh2 (%) modelados (A) e de Santos (2011) (B)

Pontos	Bairro	UR (%) média e DP (A)	UR (%) min e máx (A)	UR (%) média e DP (B)	UR (%) min e máx (B)
P01	M. Buraquinho	76,13 ± 9,48	49,74 e 95,75	81,30 ± 12,54	70,60 e 100,0
P02	Expedicionário	73,66 ± 9,67	46,85 e 95,75	76,40 ± 10,20	68,40 e 97,60
P03	Manaíra	73,32 ± 7,84	52,85 e 95,38	76,90 ± 9,60	68,10 e 98,10
P04	Cabo Branco	74,40 ± 7,50	54,92 e 96,95	75,40 ± 9,80	67,20 e 95,80
P05	Mangabeira	75,02 ± 9,03	53,73 e 98,49	78,50 ± 10,30	70,70 e 97,50
P06	Cruz das Armas	72,50 ± 10,34	46,41 e 92,92	78,20 ± 12,50	68,80 e 99,30
P07	Alto dos Mateus	72,86 ± 11,19	45,60 e 94,11	78,80 ± 12,90	69,20 e 98,40
P08	Centro	73,63 ± 10,74	46,59 e 96,73	78,80 ± 10,80	70,10 e 99,10
P09	Bancários	74,34 ± 9,17	51,12 e 97,94	75,10 ± 10,80	65,50 e 95,50

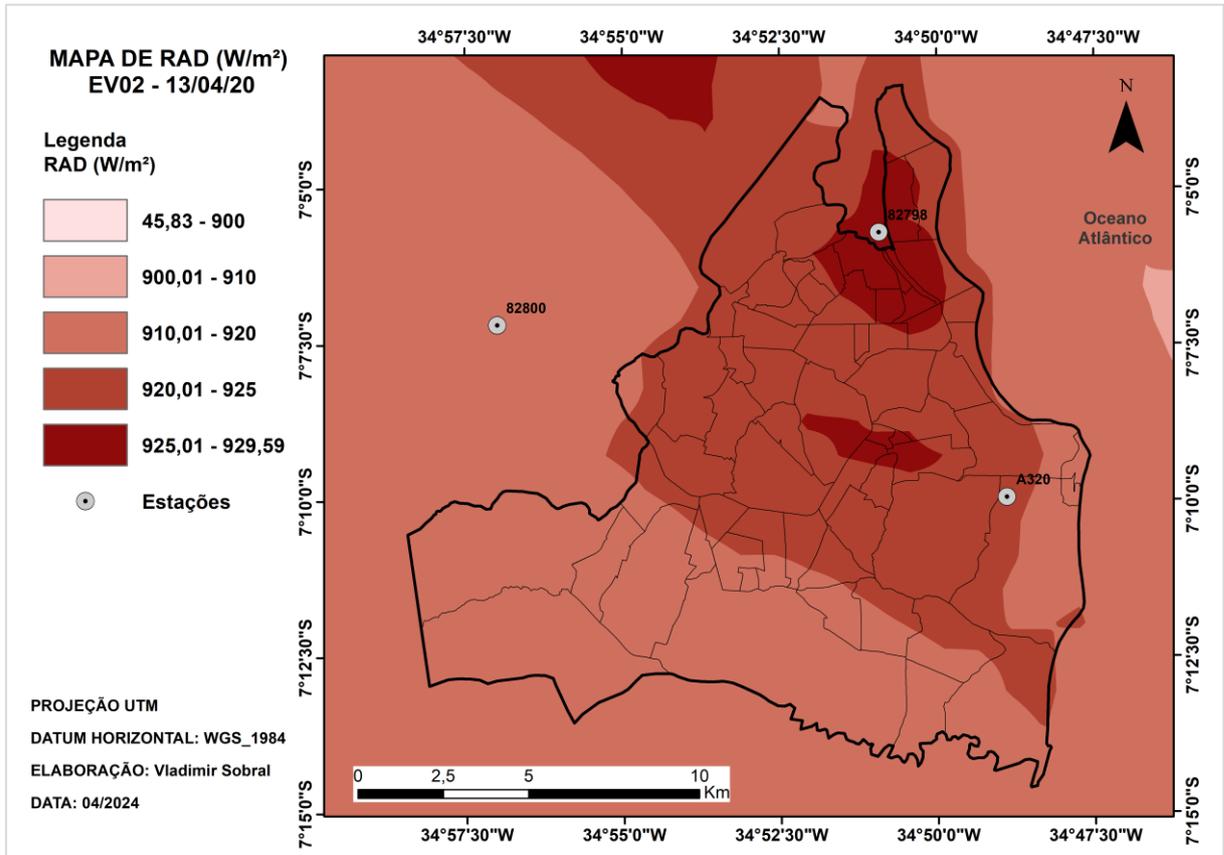
Fonte: Elaborado pelo autor

b. Radiação solar global (RAD, W/m<sup>2</sup>)

Dias sob condições de OC são caracterizados por altos valores de insolação e de baixa cobertura de nuvens (PERKINS, 2015; GIANARROS et al., 2023). Isto pode ser constatado pelos dados horários de radiação global (W/m<sup>2</sup>) coletados da estação automática A320. Obteve-se um valor médio para os quatro dias de OC do evento EV02 de 962,23 KJ/m<sup>2</sup> (267,49 W/m<sup>2</sup>), um valor bem superior para a média do mês de abril/2020 que é de 793,80 KJ/m<sup>2</sup> (220,67 W/m<sup>2</sup>). Cabe ressaltar que os dias de OC apresentaram um ciclo diário de irradiância solar global observada sem oscilações ou quedas abruptas em seus valores.

O modelo WRF indicou uma variação média da radiação solar global (W/m<sup>2</sup>) por bairros de 914,68 W/m<sup>2</sup> a 925,78 W/m<sup>2</sup>, que reflete os efeitos de atenuação sofrida pela radiação ao atravessar a atmosfera. Nota-se que a região urbana da cidade obteve valores levemente superior de RAD comparadas à região rural (sul da cidade), o que indica que o modelo WRF, para o cenário de céu claro e limpo, considerou que a superfície urbana promoveu uma menor reflexão (albedo menor) da radiação de onda curta (QI↑). Além disso, a radiação de onda longa (QL↓) sobre a área urbana é levemente superior a área rural, já que a camada de ar acima é mais quente. Na Figura 30 é apresentado a simulação do WRF para a radiação global para o dia 13/04/20 às 16h UTC.

Figura 30 – Radiação global ( $W/m^2$ ) para o dia 13/04/20 às 16h UTC.



Fonte: Elaborado pelo autor

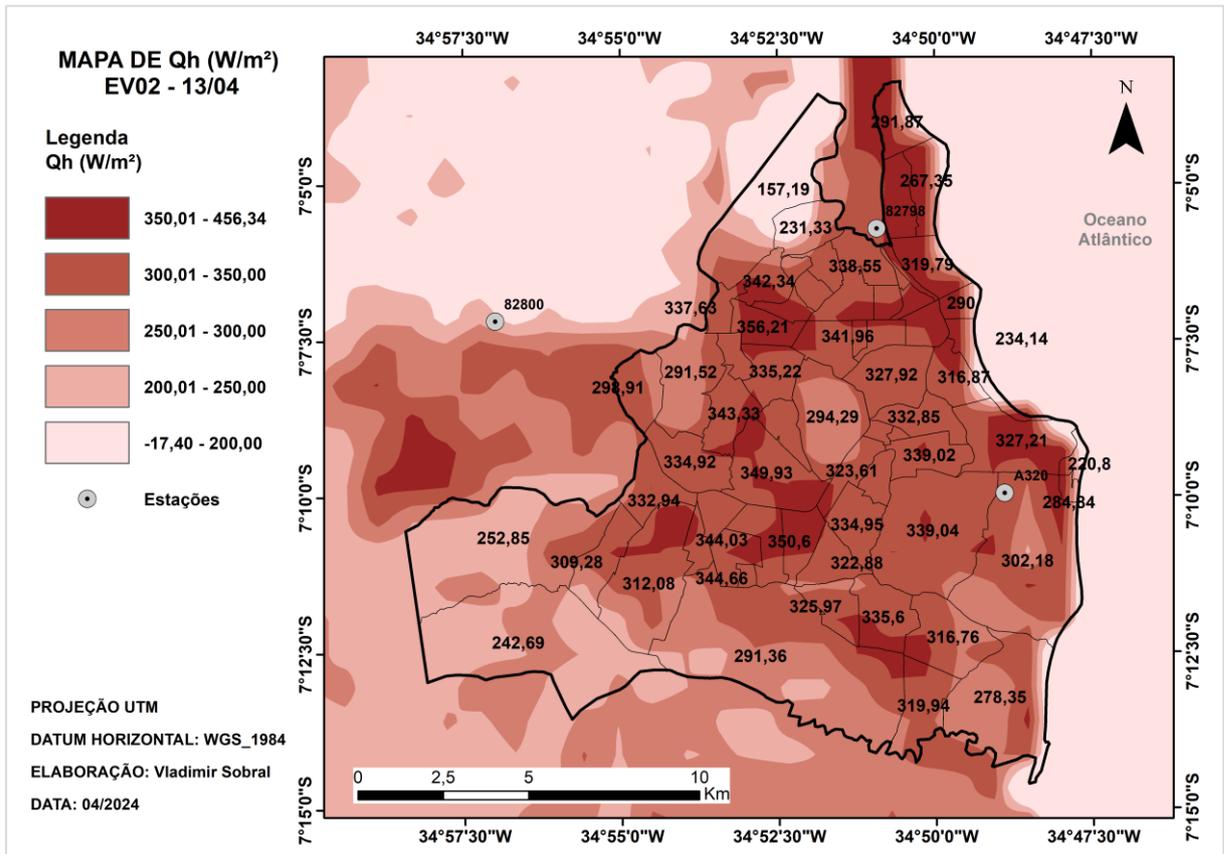
b. Fluxos turbulentos de calor sensível ( $Q_H$ ,  $W/m^2$ ) e de calor latente ( $Q_E$ ,  $W/m^2$ )

Diferentemente dos parâmetros meteorológicos apresentados anteriormente, os fluxos de calor sensível e de calor latente são fortemente influenciados pelo tipo de uso e cobertura do solo das áreas urbanas. Em geral, durante o período diurno, há um aumento de  $Q_H$  sobre a área urbana devido a geometria dos edifícios e características térmicas dos materiais construtivos, e uma redução de  $Q_E$  devido a redução da disponibilidade de umidade (OKE et al., 2017). Como pode ser visto na Figura 31, a troca de calor sensível ocorreu da superfície para a atmosfera (representado pelos valores positivos de  $Q_H$ ), decorrentes do gradiente de temperatura entre os dois meios.

Em geral, bairros com elevado adensamento, baixa presença de vegetação e afastados da orla marítima (como Tambiá, Centro e Ernesto Geisel) apresentaram valores de  $Q_H$  ( $W/m^2$ ) superiores a  $350,00 W/m^2$ . Em regiões com predominância de áreas verdes, foram registrados valores de  $Q_H$  ( $W/m^2$ ) inferiores a  $260,00 W/m^2$  (Mumbaba, Ponta do Seixas e Zona de Amortecimento, por exemplo). Nota-se que

bairros com alto adensamento e verticalização, localizados na orla marítima, não obtiverem os maiores valores médios de QH. Isto se deve a escala de grid do modelo WRF, que considerou o oceano como a superfície predominante nas regiões a leste destes bairros, reduzindo significativamente o valor médio de QH nestas regiões.

Figura 31 – Mapa de fluxo de calor sensível ( $W/m^2$ ) em 13/04/2020 às 16h.



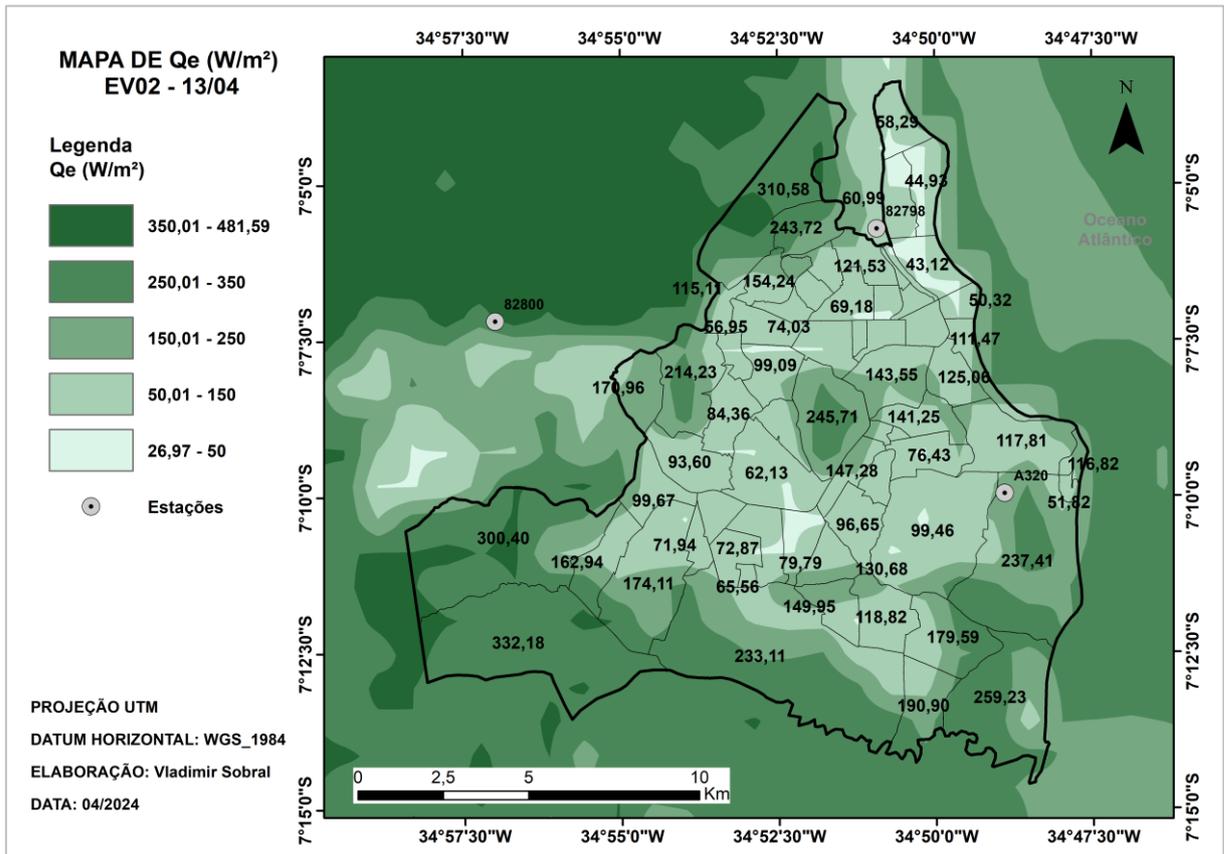
Fonte: Elaborado pelo autor

Para o fluxo de calor latente, os valores obtidos para cada bairro foram também positivos, ou seja, o calor latente foi dirigido da superfície para a atmosfera durante a mudança de estado físico da água (líquida para vapor), sem exigir uma mudança de temperatura do ar.

Os maiores valores de QE ( $W/m^2$ ) foram registrados em regiões de vegetação densa e áreas com corpos d'água, entre elas o bairro Mumbaba ( $332,18 W/m^2$ ), a Zona de Amortecimento ( $310,58 W/m^2$ ) e reserva florestal Mata do Buraquinho ( $245,71 W/m^2$ ). Os menores valores foram obtidos em bairros com alto adensamento e pouca áreas verdes, entre eles Manaíra ( $43,12 W/m^2$ ), Jardim Oceania ( $44,93 W/m^2$ ) e Tambaú ( $50,32 W/m^2$ ). Na Figura 32 é apresentado o mapa de QE ( $W/m^2$ ) para o dia 13/04/2020 às 16h UTC.

Observa-se que o valor de  $Q_E$  ( $W/m^2$ ) da Mata do Buraquinho foi inferior a bairros com predominância de vegetação rasteira (como Mumbada e Mussuré), o que está de acordo com o estudo de Teuling et al., (2010), que registrou valores menores de  $Q_e$  sobre florestas comparadas a áreas verdes (grama e pastagens).

Figura 32 – Mapa de fluxo de calor latente ( $W/m^2$ ) em 13/04/2020 às 16h.



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos valores médios de  $Q_H$  e  $Q_E$  de cada bairro, pode-se estimar se o fluxo de calor foi dominado pela evapotranspiração de áreas verdes ou pelo aquecimento da superfície. Esta estimativa é determinada pela razão de Bowen ( $\beta$ ), que é a razão simples entre  $Q_H/Q_E$  (STEWART, MILLS, 2021). Quando  $\beta < 1$ , há predominância de evaporação; e quando  $\beta > 1$ , há predominância de aquecimento do ar. Com estes parâmetros identificou-se que apenas os bairros Alto do Céu, Mussuré e Muçumagro obtiveram valores abaixo de 1, o que determina que a evapotranspiração das áreas verdes dominou os fluxos de calor nestas regiões.

### 7.1.8. Considerações sobre os resultados da abordagem meteorológica

As análises realizadas com a abordagem meteorológica forneceram informações importantes quanto ao comportamento das variáveis pesquisadas, assim como as características de OC identificadas na cidade ao longo da série temporal. De forma geral, para o período diurno, a tendência de aumento das variáveis  $T_{max}$  ( $^{\circ}C$ ) e UR (%) indica que a carga térmica em ambientes urbanos da cidade de João Pessoa pode estar se elevando, um cenário preocupante do ponto de vista do conforto térmico. Além disso, a tendência de redução da variável  $V_{vel}$  (m/s) pode indicar que o efeito atenuante do vento sobre o calor característico da cidade, e em períodos extremos, pode estar diminuindo. Para o período da noite, a tendência de redução da variável  $T_{min}$  ( $^{\circ}C$ ) indica que as noites têm se tornado mais frias, o que contribui para a dissipação do calor armazenado pelas superfícies urbanas e proporciona melhores condições para o conforto térmico do corpo humano, especialmente em dias de OC.

Quanto à caracterização das OC, as estações meteorológicas mostraram divergência no número de episódios identificados, o que reforça a identificação destes eventos extremos de calor em uma região por mais de uma estação meteorológica. Apesar disso, as características das OC identificadas foram similares em termos de duração, frequência e intensidade. Todas as estações apresentaram aumento significativo do número de eventos extremos de calor a partir do ano de 2018, em especial a estação automática A320.

A duração média dos episódios de OC foi de 3,8 dias, com o maior valor da  $T_{max}$  ( $^{\circ}C$ ) sendo alcançada no terceiro dia. O valor médio de  $T_{max}$  ( $^{\circ}C$ ) durante os episódios foi de  $32,59^{\circ}C$ , valor este não muito superior à média dos dias de verão que é de  $31,10^{\circ}C$ . A amplitude média ( $^{\circ}C$ ) de todos os eventos nas três estações foi de  $1,37^{\circ}C$ , o que mostra, de uma forma geral, que o impacto das OC na elevação da temperatura do ar não foi tão significativo quanto aos, normalmente, registrados em latitudes médias (PERKINS et al., 2015; CAMPBELL et al., 2018; DONATTI et al., 2024).

Esta informação é corroborada pelas taxas de ascensão (graus/dia) e de declínio (graus/dia) que apresentaram valores médios para as três estações de  $0,41^{\circ}C/dia$  e  $0,81^{\circ}C/dia$ , respectivamente. Portanto, o aumento da temperatura do ar por dia de evento até o seu valor máximo, tal como como a redução da temperatura do ar por dia de evento até a sua dissipação, está dentro das flutuações da climatologia do período. Apesar desta constatação, é importante ressaltar que estes são valores médios que

podem mascarar os resultados extremos. Foram registrados episódios de Ondas de Calor com valores de Tmax (°C) de 33,90°C, amplitude média de 2,00°C, taxa de ascensão de 1,31°C/dia e taxa de declínio de 3,18°C/dia.

Os dados das três estações meteorológicas indicam que estação do ano com maior número de episódios de OC foi a primavera, seguida pelo verão. Contudo, o verão registrou as maiores amplitudes médias de Tmax (°C), um valor médio de 1,49°C. Estes resultados estão em acordo com os obtidos por Bittencourt et al. (2016), que identificou uma maior ocorrência de Ondas de Calor na região do Nordeste brasileiro entre os meses de setembro e março, com pico máximo de ocorrência (aproximadamente 30%) no mês de janeiro.

No que se refere a análise dos dados climáticos nos três períodos das OC selecionados, pode-se dizer que os valores de Tmax do período DOC foram, em média, superiores ao do período Pré-OC em 0,51°C e ao do período Pós-OC em 2,33°C. Segundo a classificação da gravidade de anomalias térmicas proposto por Moura (2013, p. 58), estes episódios apresentam uma intensidade moderada, visto que estão compreendidos na faixa de intensidade entre 0,5 °C e 2,4°C. Portanto, estes episódios tenderiam, de uma forma geral, a não provocar formas mais nocivas de estresses térmicos, como síncope e golpes de calor, em populações urbanas, como os relatados por Marto (2005), por exemplo. Contudo, um maior aprofundamento da relação OC e casos de morbidade deve ser realizada por outros estudos.

Os valores médios da velocidade do vento (m/s) durante as OC estiveram dentro da média da climatologia, o que implica dizer que as OC não alteraram, de modo significativo, essa variável. Já precipitação (mm) e a umidade relativa do ar (%), apresentaram aumento de seus registros em períodos Pós-OC. Destaca-se um aumento médio de 16,80 pontos percentuais da umidade relativa do ar.

Os resultados da validação da modelagem numérica atmosférica com o modelo WRF mostraram que um único conjunto de parametrizações pode não representar adequadamente os parâmetros meteorológicos de diferentes eventos de OC. Dessa forma, conforme indicado por outros estudos, devem ser realizados testes de parametrizações para cada evento, de forma isolada, com a finalidade de obter-se o melhor conjunto de esquemas físicos.

A distribuição espacial da  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) sobre o território apresentou um padrão de comportamento esperado, em que o ar ganhou calor com o aumento da distância em relação à orla marítima, decorrente dos fluxos turbulentos de calor sensível provenientes do território da cidade. Regiões a oeste e noroeste da cidade apresentaram os maiores valores de  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). Porém, observa-se que o ganho de calor pelo ar foi inferior na região sudeste da cidade, visto que ao longo de toda a região sul os fluxos de calor sensível são inferiores aos comparados às demais regiões, e há bairros em que os fluxos de calor latente são dominantes. Desse modo, houve um efeito de amenização das áreas verdes na elevação da temperatura do ar ao longo da região sul da cidade.

Em termos de  $rh_2$  (%), a análise da distribuição espacial mostrou um comportamento oposto à  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), em que os valores de umidade relativa do ar reduziram com a distância em relação a orla marítima. Apesar desta redução, os valores de toda a região mais ocidental da cidade ainda permaneceram próximos a 60%, que está dentro de limites aceitáveis para o conforto térmico humano.

Apesar dos dias de OC serem, geralmente, caracterizados por uma maior entrada de radiação solar direta na superfície urbana, comparados aos dias anteriores ao evento, os dados meteorológicos coletados indicaram que os valores médios de RAD ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) por dia do evento EV02 foram similares aos três dias anteriores (período Pré-OC). Porém, é importante ressaltar que os dias Pré-OC também registraram valores de  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) superiores ao limiar de  $T_{\text{max}}$  para definição de uma OC, o que indica que também foram dias com entrada de radiação acima da média para o mês de abril. Quanto a distribuição espacial da RAD ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) pelo modelo WRF, os resultados indicam uma distribuição praticamente homogênea ao longo do território, com uma leve atuação da área urbana no aumento dos valores deste dado meteorológico.

Os resultados da distribuição espacial dos fluxos de calor sensível (QH) e calor latente (QE) sobre a cidade estão de acordo com estudos anteriores (TEULING et al., 2010; KONG et al., 2023; WE et al., 2024). Os bairros com predominância de áreas adensadas e impermeáveis apresentaram valores de QH mais elevados e de QE mais baixos, comparados às áreas verdes. Como há bairros que ainda preservam áreas verdes em seus limites, os valores de QE foram, em geral, superiores a  $40 \text{ W}/\text{m}^2$ , o que pode divergir dos estudos citados, que apresentaram valores de superfícies impermeáveis próximos a  $0 \text{ W}/\text{m}^2$ .

## 7.2. ABORDAGEM CLIMÁTICA URBANA

Nesta seção são apresentados os resultados da abordagem climática urbana, representadas pela análise da distribuição espacial das variáveis TRM (°C) e WSPEED (m/s) sobre a área de estudo, realizadas nos módulos SOLWEIG E URock.

### 7.2.1. Análise espacial da TRM (°C) e WSPEED (m/s) sobre a área de estudo

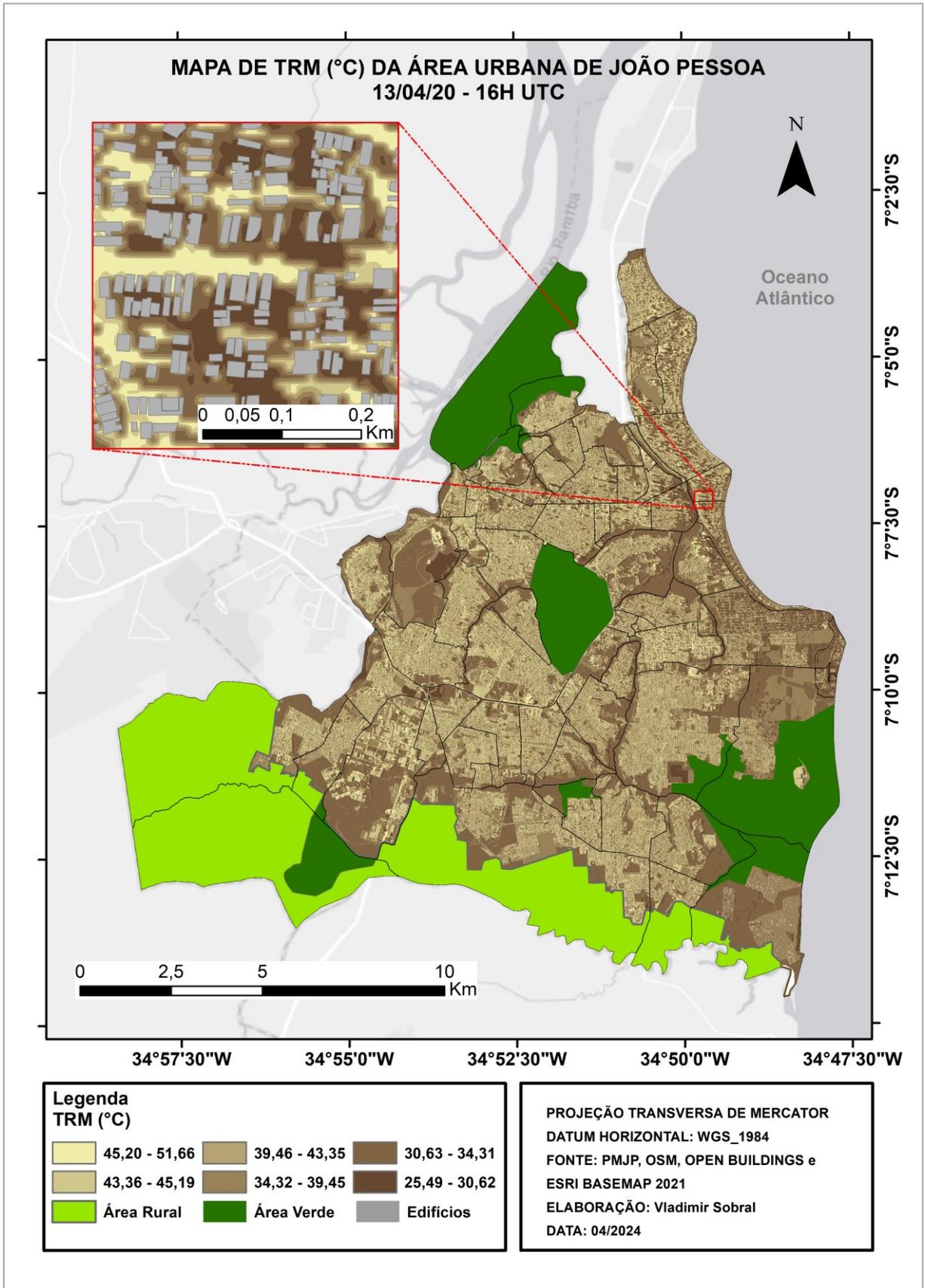
#### a. Temperatura radiante média (TRM, °C)

Como descrito no Capítulo 1, o principal parâmetro que rege a sensação térmica humana em dias quentes e de céu-claro é a radiação solar, e sua ação no corpo humano é determinada pela temperatura radiante média (KRÜGER et al., 2014; CHEN et al., 2016; GÁL, KÁNTOR, 2020; BUO et al., 2023). Além disso, a TRM se mostra um indicador mais adequado do que a temperatura do ar para avaliar a carga térmica de ambientes no corpo humano, especialmente durante Ondas de calor (THORSSON et al., 2014).

Com base nos dados meteorológicos obtidos pelas simulações no modelo WRF (T2, rh2, RAD, QH e QE) e nos dados morfológicos urbanos produzidos no modelo UMEP (MDS, CDSM, TDSM e FVC), elaborou-se no plug-in SOLWEIG o mapa da TRM (°C) da área urbana da cidade de João Pessoa, para o dia 13/04/2020 às 16H UTC (Figura 33). Os resultados da estatística descritiva aplicada aos dados do mapa de TRM (°C) mostram um valor médio de 37,29°C e desvio padrão de  $\pm 6,29^\circ\text{C}$ . Os valores máximo e mínimo foram de 51,66°C e de 25,48°C, respectivamente, o que resulta em uma amplitude térmica de 26,18°C.

Como era esperado, observa-se que baixos valores de TRM (°C) ( $< 30,70^\circ\text{C}$ ) estão geralmente associados aos corpos d'água e suas margens (com vegetação rasteira) e às áreas verdes com grande vegetação arbórea. Em momento de elevada altura solar (próximo ao zênite), os corpos d'água absorvem grande parte da radiação solar direta ( $Q_{I\downarrow}$ ), reduzindo os valores de TRM (°C) no entorno imediato.

Figura 33 – Mapa de TRM (°C) da área urbana de João Pessoa – 13/04/2020 às 16h UTC.



Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto às áreas verdes, o sombreamento provocado pela copa das árvores reduz a incidência direta da radiação solar no solo, o que contém o aumento da temperatura da superfície e uma maior emissão de radiação de onda longa ( $QL\uparrow$ ). Além disso, a radiação de onda curta é, em grande parte, absorvida pelas folhas, o que reduz a reflexão (ROMERO, 2001). Isso é particularmente importante para o conforto térmico, pois reduz a carga térmica sobre pessoas próximas às áreas verdes. No mapa de TRM ( $^{\circ}C$ ) é possível observar que as regiões sudeste e sul da cidade contam com grandes áreas com baixos valores de TRM ( $^{\circ}C$ ), decorrentes da maior presença de vegetação.

Embora algumas áreas da cidade apresentem poucas áreas verdes ou reduzida arborização viárias, o sombreamento provocado por edificações com mais de 10 pavimentos criou espaços com baixos valores de TRM ( $^{\circ}C$ ). Este efeito pode ser visto em bairros com elevado número de edifícios altos, entre eles Manaíra, Tambaú, Brisamar e Miramar. Um caso similar foi relatado por Li (2021) ao avaliar a distribuição espacial de TRM ( $^{\circ}C$ ) na cidade de Filadélfia, Estados Unidos. O autor relatou que, embora se esperasse que no centro da cidade fossem registrados altos valores de TRM ( $^{\circ}C$ ), o sombreamento dos arranha-céus criou áreas com baixa exposição ao calor.

Devido à altura solar, as coberturas das edificações tiveram um grande impacto no mapeamento da TRM ( $^{\circ}C$ ). Os maiores valores deste atributo climático ( $> 43,87^{\circ}C$ ) foram encontrados na cobertura de edificações, que se apresentam mais expostas a entrada da radiação solar direta na atmosfera e menos suscetíveis aos efeitos do sombreamento provocado por elementos do meio urbano. Como a informação do material da cobertura dos edifícios não foi utilizada nesta pesquisa, e nem o modelo UMEP a utilizada para computo da TRM ( $^{\circ}C$ ), não é possível afirmar qual a resposta térmica de diferentes materiais de cobertura das edificações da cidade. Contudo, registraram-se extensas superfícies com elevados valores de TRM ( $^{\circ}C$ ), especialmente no Bairro das Indústrias, decorrentes da cobertura de grandes construções, como galpões, armazéns e ginásios de esportes.

Ao longo dos cânions urbanos, os maiores valores de TRM ( $^{\circ}C$ ) são encontrados em áreas com grande exposição à radiação de onda curta incidente ( $QI\downarrow$ ) e de onda longa incidente ( $QL\downarrow$ ), particularmente próximas as fachadas dos edifícios que estão voltados para os quadrantes norte e leste, e que não estejam sobre os efeitos do

sombreamento de edifícios próximos ou árvores de entorno. Estas fachadas contribuem com o aumento da TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) por refletir parte da radiação solar direta (QR) e por emitir radiação de onda longa ( $\text{QL}\uparrow$ ), decorrente de seu aquecimento ao longo do dia. Cabe ressaltar que a contribuição das fachadas no aumento da TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) de ambientes abertos muda com a mudança da posição do sol ao longo do dia e ano.

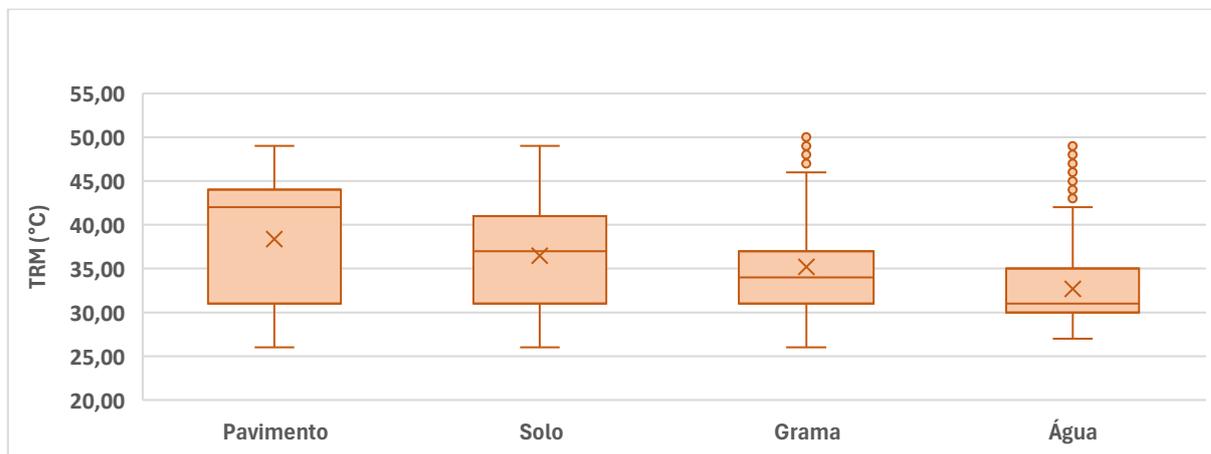
Como pode ser visto na ampliação da Figura 33, elevadas variações da TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) são registradas mesmo em pequenas áreas, diferentemente das variações habituais da temperatura do ar no meio urbano. Isso se deve principalmente pelo sombreamento decorrente da geometria dos edifícios, da copa das árvores e da topografia, além das características térmicas e radiativas dos materiais de superfície circundante (albedo e emissividade), que apresentam grande variabilidade no espaço urbano. Importante notar que, devido a posição do sol no momento da análise, edifícios altos com orientação norte/sul provocam grandes áreas de sombra sobre as vias públicas voltadas a leste, induzindo a redução da TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) mesmo em superfícies pavimentadas.

Conforme Guo et al. (2020), a variação espacial da TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) sobre áreas urbanas pode variar de 10 a 20 $^{\circ}\text{C}$  entre locais sombreados e não sombreados, mas pode alcançar amplitudes superiores em superfícies que são significativamente expostas à entrada da radiação solar. Como exemplo, ao mapear a TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) de um campus da Universidade do Arizona, Estados Unidos, Middlel et al. (2017) registraram valores para locais sombreados pela manhã (tarde) na faixa de 49,00 $^{\circ}\text{C}$  a 50,00 $^{\circ}\text{C}$  (49,4 $^{\circ}\text{C}$  a 50,1 $^{\circ}\text{C}$ ), enquanto em áreas expostas ao sol valores de TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) próximos a 58,60 $^{\circ}\text{C}$  (57,20 $^{\circ}\text{C}$ ). Na cidade de João Pessoa, Lima et al. (2019) coletaram informações de TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) em um parque zoológico da cidade. Para o período seco, entre às 09:00 e 16:00 local, os valores máximo, médio e mínimo de TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) foram 35,00 $^{\circ}\text{C}$ , 31,00 $^{\circ}\text{C}$  e 25,00 $^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

Quanto à resposta térmica média de diferentes tipos de superfície, as áreas pavimentadas obtiveram os maiores valores médios, seguido do solo exposto, da grama e da água. Este resultado era esperado, visto que é constatado em diversas pesquisas do clima urbano (LAI et al., 2017). Segundo as simulações do plugin SOLWEIG, os valores mediano e médio de cada superfície foram 42,00 $^{\circ}\text{C}$  e 38,33 $^{\circ}\text{C}$ , 37,00 $^{\circ}\text{C}$  e 36,46 $^{\circ}\text{C}$ , 34,00 $^{\circ}\text{C}$  e 35,21 $^{\circ}\text{C}$  e 31,00 e 32,69 $^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. O maior intervalo interquartil foi obtido pelo solo pavimentado, com 13,00 $^{\circ}\text{C}$  de amplitude e valor

máximo de 44,00°C e mínimo de 31,00°C. Os dados revelam que a superfície pavimentada apresentou um valor mediano de 5,00°C superior ao solo exposto e de 8,00°C superior ao solo tipo grama. Os valores estatísticos para as quatro superfícies avaliadas são demonstrados na Gráfico 8 pode meio de gráfico *box plot*.

Gráfico 8 – *Box plot* dos valores de TRM (°C) de diferentes superfícies.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os bairros João Agripino, Grotão, Jaguaribe e Expedicionários apresentaram altos valores de TRM (°C) sobre seus territórios, o que indica que são regiões com alta impermeabilidade do solo, elevado adensamento e baixa presença de vegetação. Os valores médios e desvio padrão de cada bairro foram 40,48°C e  $\pm 6,15^\circ\text{C}$ , 40,13°C e  $\pm 6,44^\circ\text{C}$ , 40,11°C e  $\pm 6,42^\circ\text{C}$  e 40,09°C e  $\pm 6,95^\circ\text{C}$ , respectivamente. Os bairros Ponta do Seixas, Barra de Gramame, Penha e Costa do Sol registram baixos valores de TRM (°C), resultado do predomínio de áreas com árvores de grande porte, alta permeabilidade do solo e baixo adensamento. Os valores médios e desvio padrão destes bairros foram 33,08°C e  $\pm 5,33^\circ\text{C}$ , 33,24°C e  $\pm 2,67^\circ\text{C}$ , 33,58°C e  $\pm 5,35^\circ\text{C}$  e 34,71°C e  $\pm 4,89^\circ\text{C}$ , respectivamente. Constata-se, portanto, uma diferença entre os valores médios de TRM (°C) dos bairros da cidade de 7,04°C.

No que se refere a acurácia das informações coletadas de TRM, de acordo com Staiger e Matzarakis (2014) os níveis exigidos para um único valor de TRM são definidos em termos de conforto térmico e estresse ao calor/frio na norma ISO 7726 (*International Organization for Standardization*, 1998). Ou seja, a norma estipula um valor de  $\pm 2$  K para o conforto térmico e de  $\pm 5$  K para o estresse ao calor/frio. Dentro deste contexto, os autores recomendam que, para atender os níveis exigidos pela norma 7726 para o estresse ao calor/frio, é necessário ao menos o uso de dados de

radiação solar global como dado de entrada para a modelagem da TRM em modelos numéricos.

Gál e Kántor (2021) avaliaram o desempenho dos modelos microclimáticos Rayman, ENVI\_met e SOLWEIG quanto à estimativa da TRM em uma praça da cidade de Szeged, Hungria. Com base nos resultados de índices estatísticos, o plugin SOLWEIG foi o modelo mais preciso e que melhor reproduziu as tendências de temperatura radiante média observadas. Além disso, como os erros diurnos do plugin foram mínimos próximos ao meio-dia e à tarde, os autores concluíram que o SOLWEIG se apresenta como um modelo ideal para pesquisas de conforto térmico e mitigação de calor, que geralmente focam o período mais quente do dia.

Dentro deste cenário, uma questão que se apresenta é a sensibilidade do índice PET à TRM. Algumas pesquisas indicam que em dias de céu claro tanto em ambientes ensolarados quanto sombreados, a relação entre as duas variáveis está próxima de 0,5, ou seja, um aumento de 10°C na TRM implica um aumento de 5,0 – 5,10°C nos valores de PET (MATZARAKIS et al., 2007; HOLST, MAYER, 2011). Porém, Cohen et al. (2012) alertam que a influência de TRM no índice PET e a relação entre os dois depende tanto das características do local quanto da estação do ano. De todo modo, ao se avaliar a sensação térmica de uma população baseada em intervalos de estresse térmico, estas diferenças podem colocar os resultados do índice PET em um intervalo de escalas de sensação térmica diferente dos valores derivados da observação. Neste sentido, esta é uma questão que pode ser abordada ao se estimar o índice PET a partir de dados modelados de TRM.

#### b. Velocidade do vento (WSPEED, m/s)

No que diz respeito a análise do vento no ambiente urbano, esta pode ser realizada em diferentes escalas (LOPES, 2003; OKE et al., 2017). Porém, a este trabalho interessa a compreensão do comportamento dos escoamentos horizontais do vento em escala intraurbana a uma altura de 1,50 m do solo, que é a altura recomendada por Höpfe (1999) para a determinação do índice PET, foco deste trabalho.

Esta altura está dentro da camada de ar que OKE et al. (2017) conceituam como camada de dossel urbano, que descreve o espaço entre o solo e a cobertura dos edifícios (STEWART, MILLS, 2021). Nesta camada, os escoamentos dos ventos são regidos, prioritariamente, pelos fluxos do ar das camadas superiores e características

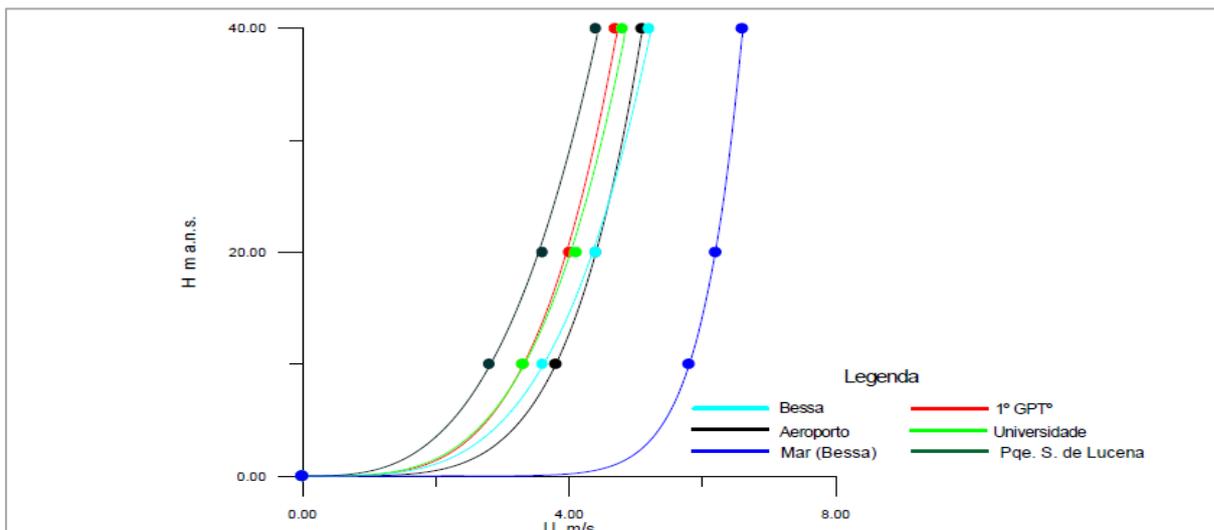
urbanas locais, como a topografia, as dimensões e geometrias dos edifícios, as ruas, o tráfego e a presença de árvores (SANTAMOURIS, 2004). Desse modo, a velocidade média do vento tende a ser menor do que nos arredores, decorrente da maior rugosidade ( $Z_0$ ) da superfície edificada da cidade (BARBIRATO, SOUZA, TORRES, 2007).

Apesar do impacto dos elementos urbanos na redução a velocidade do ar, a ação das diferentes configurações de vias e edifícios pode acelerar o fluxo dos ventos ao longo a malha urbana, além de provocar diferentes efeitos aerodinâmicos no vento (PRATA, 2005, p. 53). Desse modo, a configuração de edifícios pode provocar tanto zonas de estagnação quanto zonas de aceleração dos ventos. Estas zonas são bem demonstradas em estudos que se utilizam de técnicas de erosão de areia, em túneis de vento, ou de modelagem numérica em escala microclimática (SILVA, 1999; LOPES, 2003; PEREGRINO, 2005, CARVALHO, 2006; FERREIRA, 2009).

O mapeamento do vento na escala da cidade é algo que exige uma considerável quantidade de informação espacial da área de estudo, especialmente relacionada às dimensões e geometria das edificações, a topografia e a presença e característica das árvores em via urbana. Além disso, os dados disponíveis pelas prefeituras ou órgãos governamentais nem sempre estão atualizados, logo os resultados demonstrados podem divergir da realizada urbana atual. A presente tese buscou utilizar dados da cidade de João Pessoa para o ano de 2020, ano do evento extremo de valor EV02. Os dados espaciais referem-se a dados morfológicos urbanos produzidos nas etapas anteriores desta pesquisa, nomeadamente MDS e CDSM.

Para os cálculos de velocidade e direção dos ventos a uma altura determinada pelo usuário (nesta pesquisa 1,50 m), o plugin Urock exige como dados de entrada a velocidade do vento a altura de referência (m) ou o perfil vertical de velocidade do vento e a direção predominante do vento (graus). Como o modelo WRF não produziu resultados dentro de limites aceitáveis, utilizou-se o estudo desenvolvido por Silva (1999) para a cidade de João Pessoa. O autor estimou perfis de velocidade do vento com base em dez anos de dados registrados pela estação 82800 (aeroporto), com a aplicação do modelo WasP. Na Figura 34 são apresentados perfis de velocidade para um ponto no oceano, quatro pontos da malha urbana da cidade e o aeroporto.

Figura 34 – Representação dos perfis de velocidade (João Pessoa)



Fonte: Silva (1999), p. 23.

Os resultados para a altura de 10 m indicam um gradiente entre o mar (5,8 m/s) e o parque Solon de Lucena (2,8 m/s) de 3,0 m/s, o que demonstra os efeitos da rugosidade da superfície da cidade sobre os ventos locais. Contudo, este gradiente é reduzido quando tomados em conta apenas os pontos situados dentro da área urbana da cidade. Deste modo, a diferença entre o ponto Bessa (3,6 m/s), localizado na orla marítima, e o parque Solon de Lucena, localizado no centro comercial da cidade, é de 0,8 m/s).

Ressalta-se que os valores dos perfis de velocidade dos ventos estimados por Silva (1999) retratam valores médios do vento para uma série histórica de 10 anos e esta pesquisa foca em momento específico de uma Onda de Calor ocorrida na cidade. Assim, buscou-se identificar os valores registrados pelas três estações meteorológicas situadas na RMJP em 13/04/2020, mais próximos às 16h UTC (Tabela 15).

Tabela 15 – Dados de vento das três estações meteorológicas da RMJP para 13/04/2020.

Estação meteorológica	Hora do dado (UTC)	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento (graus)
82798	18:00	1,30	135° a 144°*
82800 (aeroporto)	18:00	4,60	110
A320	16:00	1,70	134

\*Baseado no código OMM 0877 (B823, 2015).

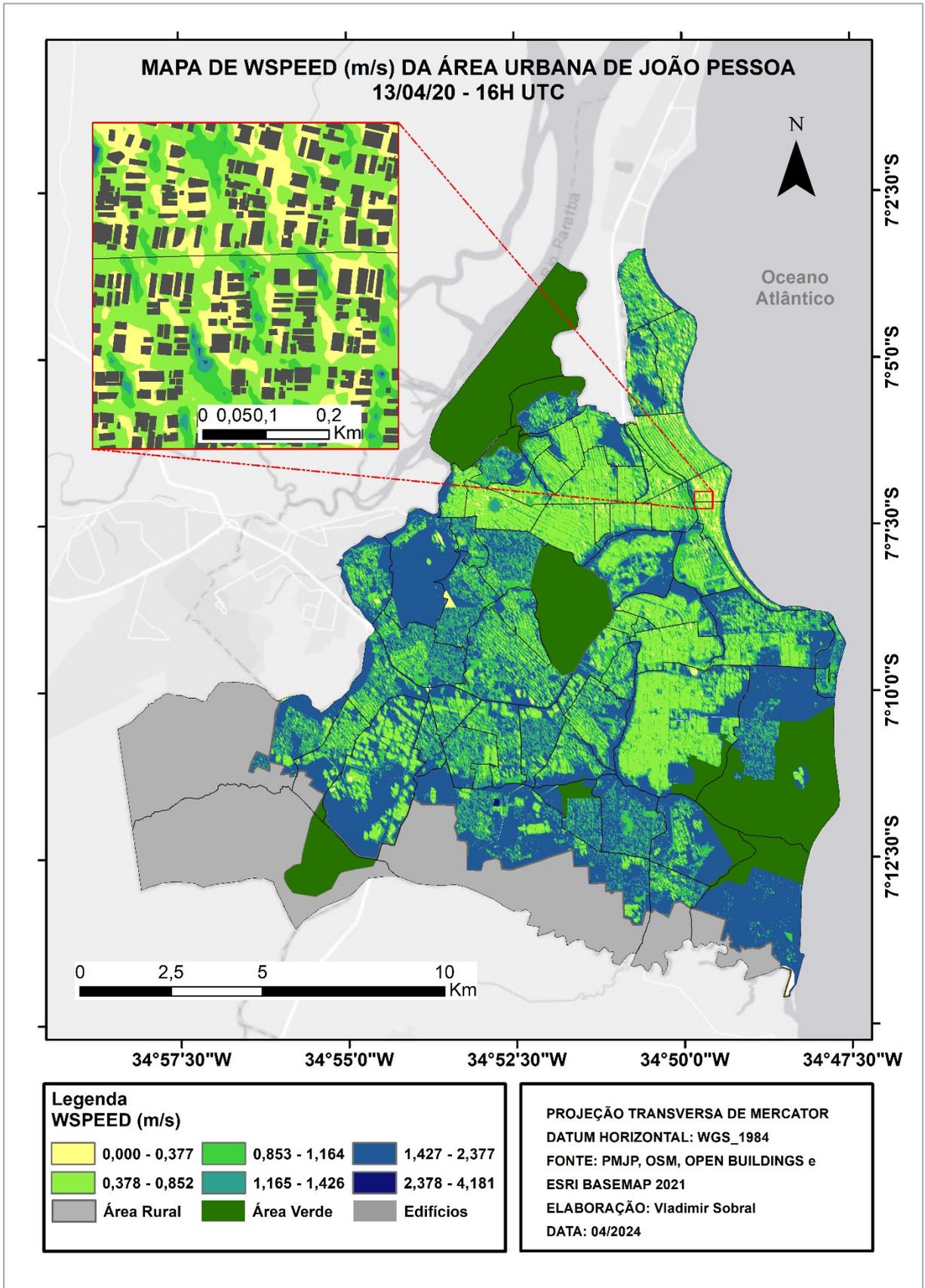
Observa-se que os valores registrados pelas estações são, em certa medida, bem diferentes aos obtidos por Silva (1999). As estações meteorológicas próximas a orla marítima (82798 e A320) registraram valores bem inferiores para o ponto Bessa (3,6 m/s). Isto é algo notável, pois, habitualmente, no período da tarde são registrados os maiores valores de velocidade do vento na cidade (CARVALHO, 2006). A estação 82800 registrou um valor 0,8 m/s superior à média determinada por Silva (1999), que foi de 3,8 m/s para o aeroporto.

A diferença registrada pelas duas estações 82798 e A320 pode ser explicada pela rugosidade da área de entorno frente aos ventos, pois a primeira está inserida em região de grande adensamento urbano e a segunda em região com predominância de áreas verdes. Cabe ainda ressaltar que uma tendência de redução da velocidade dos ventos na cidade de João Pessoa foi observada nesta pesquisa por meio de análise estatística descritiva e do teste de Man-Kendall, que mostraram uma significativa diminuição da velocidade dos ventos a partir do ano de 2017. Neste contexto, julgou-se utilizar a velocidade de 2,0 m/s e a direção de 135° como dados de entrada para o modelo UMEP.

Com o resultado das modelagens no plugin Urock, elaborou-se o mapa de WSPEED (m/s) da área urbana da cidade de João Pessoa, para o dia 13/04/2020 às 16H UTC (Figura 35), em uma resolução espacial de 10 m. Os resultados da estatística descritiva aplicada aos dados do mapa mostram um valor médio de 1,16 m/s e desvio padrão de  $\pm 0,46$  m/s. Os valores máximo e mínimo foram de 0,00 m/s e de 4,18 m/s, respectivamente. Cabe ressaltar que valores acima de 2,09 m/s representam apenas 0,02% do mapa.

Por meio da função *Zonal Statistics as Table* do software ArcGIS, os valores médios e desvio padrão da WSPEED (m/s) foram estimados para todos os bairros da cidade (Apêndice 7). Em função dos valores de rugosidade da superfície associada, os bairros Expedicionários, Tambaú, Centro e Brisamar apresentaram os mais baixos valores médios de WSPEED (m/s) sobre seus territórios, com valores médios e desvio padrão de 0,70 m/s e  $\pm 0,26$  m/s, 0,73 m/s e  $\pm 0,43$  m/s, 0,75 m/s e  $\pm 0,26$  m/s e 0,77 m/s e  $\pm 0,32$  m/s, respectivamente. Os bairros Barra de Gramame, Ilha do Bispo, Costa do Sol e Ponta do Seixas registraram os mais altos valores médios de WSPEED (m/s), com valores médios e desvio padrão de 1,53 m/s e  $\pm 0,34$  m/s, 1,52 m/s e  $\pm 0,24$  m/s, 1,45 m/s e  $\pm 0,34$  m/s e 1,42 m/s e  $\pm 0,22$  m/s, respectivamente.

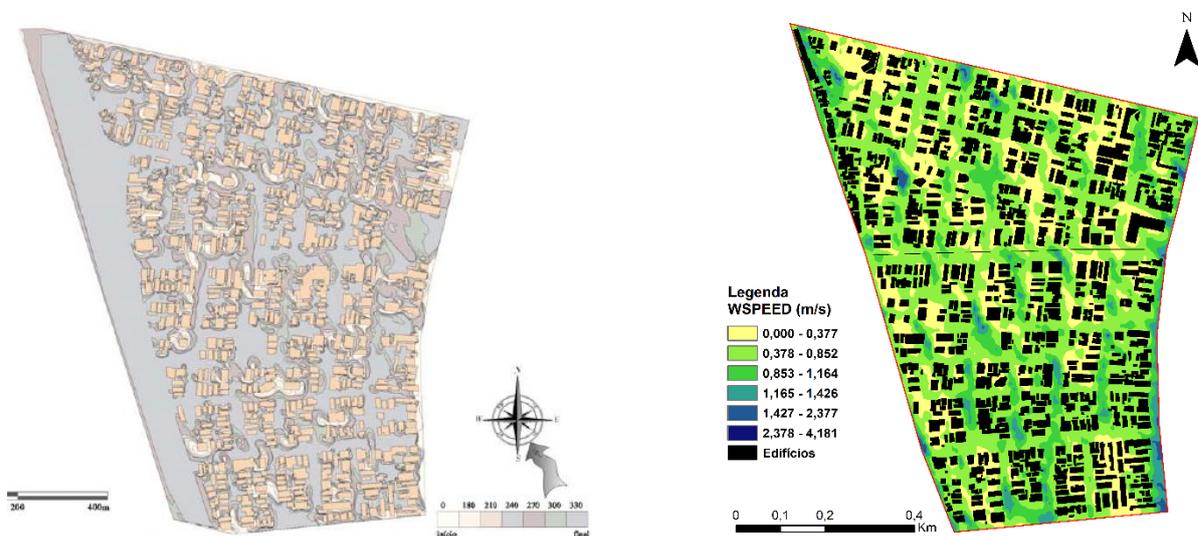
Figura 35 – Mapa de WSPEED (m/s) de João Pessoa para o dia 13/04/2020 às 16H UTC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os dados do mapa de WSPEED (m/s), observou-se zonas de estagnação dos escoamentos de ventos, localizadas principalmente em bairros com grande concentração de edifícios de grandes dimensões, especialmente em altura. Dentre estes bairros, podem ser citados Tambaú e Cabo Branco, localizados na orla marítima da cidade de João Pessoa. Estas zonas também foram observadas por Peregrino (2005), que avaliou o impacto das dimensões e geometria dos edifícios no escoamento dos ventos destas áreas, por meio do uso de medições de campo, de técnica de erosão de areia em uso de túnel de vento e de modelagem microclimática com o software Wasp. Peregrino (2006) identificou que o percentual de área não erodida alcançou valores próximos a 31,00%. O autor relata que o escalonamento dos edifícios, decorrente da legislação urbana para a orla marítima, induziu a uma elevação da Camada Limite Atmosférica, impactando a entrada do escoamento dos ventos nesta área. Na Figura 36 são apresentados a figura de erosão da região de estudo de Peregrino (2006) e o resultado da modelagem com o plugin Urock.

Figura 36 – Figura de erosão (esquerda) elaborada por Peregrino (2006) e resultado da modelagem no plugin UMEP (direita).



Fonte: Adaptado de Peregrino (2006).

Diversos estudos demonstram que a formação de zonas de estagnação do escoamento dos ventos em áreas urbanas, especificamente as de clima quente e úmido, pode acarretar problemas relacionados ao aumento do consumo de energia para refrigeração pelas edificações, dificuldade de dispersão de poluentes atmosféricos provenientes de tráfego e aumento do estresse térmico da população local nos espaços públicos (FRÖHLICH, MATZARAKIS, 2018).

Estudo realizado por Carvalho (2006) nos bairros de Tambaú e Cabo Branco obteve valores médios da velocidade do vento em seis pontos de coleta, durante o mês de novembro / 2004 para o período da tarde (entre 14h e 16h). O autor registrou uma variação significativa de valores médios de velocidade dos ventos entre os pontos, com valores mínimos e máximos de 1,0 e de 2,2 m/s, respectivamente, para os ventos com direção predominante de sudeste (150°).

Cabe ressaltar que os valores absolutos de velocidade dos ventos das pesquisas ora citadas são de difícil comparação com os desta tese, uma vez que o adensamento urbano e os valores de velocidade do vento avaliados pelos autores são retratos de diferentes épocas e condições atmosféricas. Além disso, os resultados obtidos pela modelagem numérica desta pesquisa são fruto de diversos parâmetros adotados, tanto de informações mais atualizadas da área de estudo quanto dos parâmetros dos dados de saída do modelo, entre eles a resolução horizontal e vertical e a altura dos dados de saída de vento. Neste sentido, o importante desta comparação é a confirmação de que a modelagem numérica conseguiu identificar a estagnação do vento em bairros verticalizados, mesmo que estes estejam situados em áreas favoráveis a ventilação natural, como a orla marítima.

### **7.2.2. Considerações sobre os resultados da abordagem climática urbana**

No que diz respeito aos resultados da avaliação da distribuição da TRM (°C) sobre a área de estudo, os dados indicaram valores elevados para este parâmetro climático, o que era esperado em função da maior entrada de radiação solar em período de Onda de Calor e horário da análise. O valor médio da TRM (°C) para a área de estudo foi de 37,26 °C com uma amplitude térmica de 26,18 °C. Ao considerar a relação entre TRM e PET próxima a 0,50, descrita por Matzarakis et al. (2007), a amplitude térmica da TRM registrada pode implicar uma variação do PET (°C) de 13,09 °C dentro da área urbana da cidade de João Pessoa.

Esses resultados indicam que, de uma forma geral, o ordenamento urbano e os tipos de superfície predominantes conduzem a uma elevada carga térmica experimentada pela população local, na maioria das regiões da cidade, decorrente de uma Onda de Calor. Assim, torna-se necessário o emprego de estratégias urbanísticas e arquitetônicas, que reduzam o ganho de calor nos espaços públicos, como o aumento de áreas sombreadas, uso de matérias de elevado albedo, aumento da vegetação urbana, redução de pavimentação asfáltica, entre outros.

Os resultados obtidos acerca da WSPEED (m/s) revelam um cenário preocupante para o estresse térmico, devido às baixas velocidades registradas, que reduzem a dissipação da carga térmica em momentos de Ondas de Calor. O valor médio para esta variável foi de 1,16 m/s para todo o território avaliado, porém diversos bairros da cidade obtiveram valores médios próximos a 0,7 m/s. Ademais, foram identificadas zonas de estagnação do escoamento dos ventos na malha urbana, observadas em trabalhos anteriores. Conforme Fröhlich e Matzarakis (2018), valores inferiores a 0,5 m/s tem impacto insignificante nos valores de PET, sendo mais perceptíveis os valores acima de 1,0 m/s.

Dentro deste contexto, torna-se urgente a necessidade de formulação de diretrizes de planejamento urbano que favoreçam o escoamento dos ventos ao longo da malha urbana da cidade, uma vez que, segundo Xie et al. (2018), em situação de PET (°C) elevado, ou seja, elevado estresse térmico positivo, o vento torna-se uma importante componente na amenização do calor experimentado por uma população.

### **7.3. ABORDAGEM BIOMETEOROLÓGICA HUMANA**

Nesta seção serão apresentados a validação dos dados do módulo SpatialTC, o mapeamento do índice PET (°C) da área urbana da cidade de João Pessoa, as análises estatística e exploratória espacial dos dados de PET (°C) e parâmetros urbanos. Adicionalmente, serão demonstrados a identificação de regiões que promoveram desconforto térmico em momento de estresse térmico do EV02 e o percentual de população exposta aos diferentes graus de estresse ao calor.

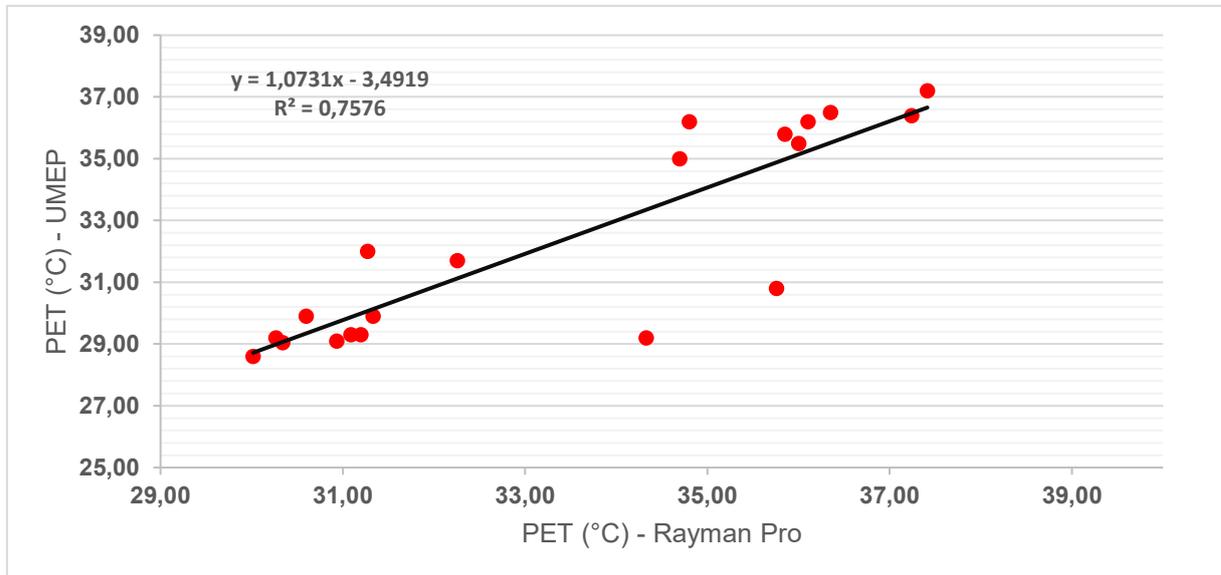
#### **7.3.1. Validação dos dados do módulo SpatialTC (UMEP)**

O resultado da análise de correlação de Spearman entre os dados de PET (°C) modelados no modelo Rayman Pro e no módulo SpatialTC indicou uma forte correlação positiva (0,87). Neste sentido, os modelos apresentaram tendência similares quanto ao aumento ou redução do PET, a depender das características climáticas dos pontos analisados. Como pode ser visto no Gráfico 9, a análise de regressão linear simples apresentou um valor de  $R^2 = 0,75$ , o que sugere que grande parte dos dados do modelo Rayman explicam os valores do modelo UMEP.

Interessante notar que as maiores discrepâncias entre os valores do SpatialTC e do Rayman ocorreram em apenas dois pontos, caracterizados por uma região de alta impermeabilidade do solo. Desse modo, o modelo SpatialTC pode ter considerado o

alto impacto da área pavimentada na estimativa do PET (°C), ou seja, um alto valor atribuído a TRM (°C) que levou a uma superestimação do PET comparada ao Rayman.

Gráfico 9 - Gráfico de dispersão dos dados do SpatialTc e Rayman Pro



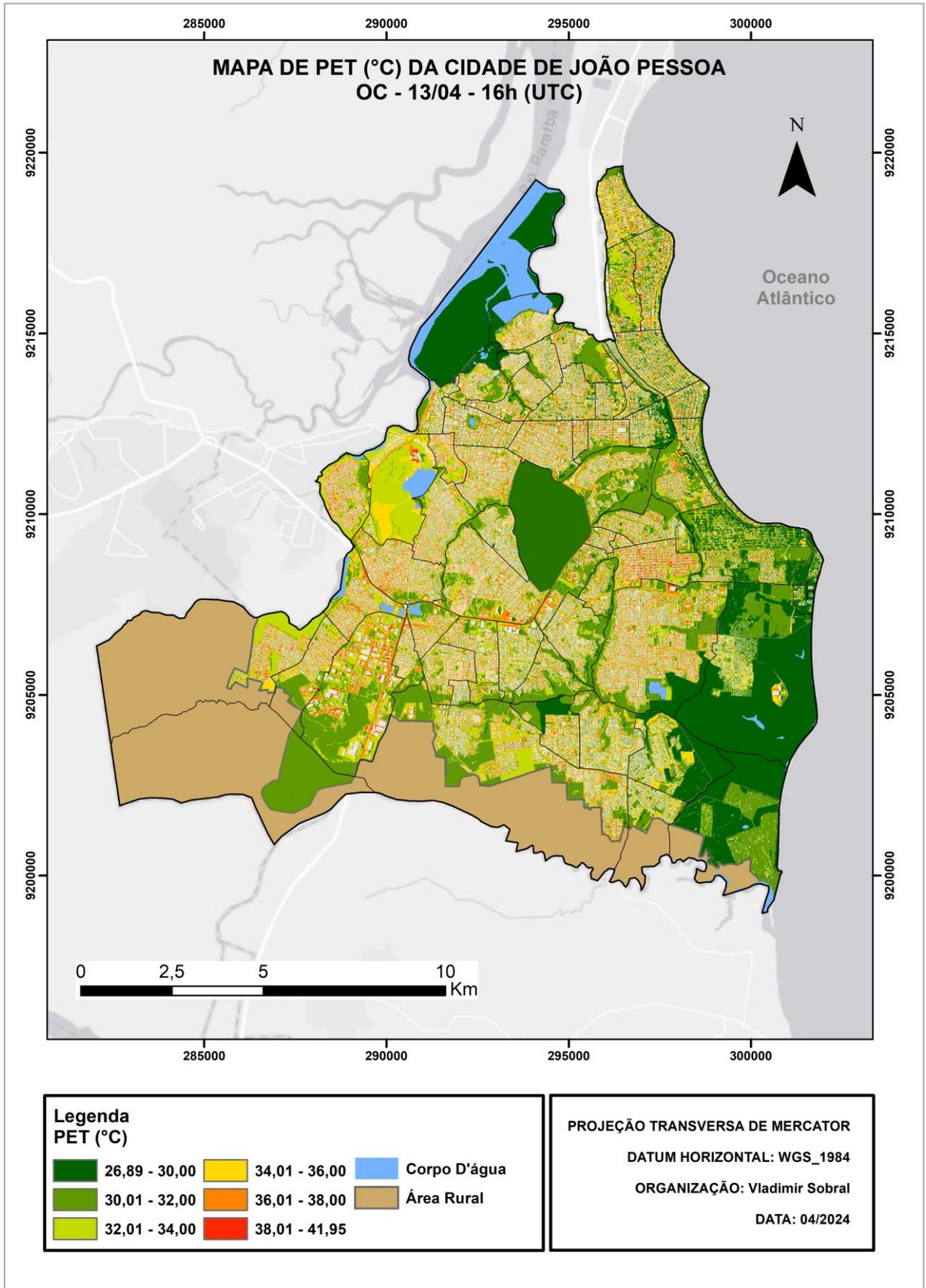
Fonte: Elaborado pelo auto

### 7.3.2. Mapeamento do índice PET (°C) da cidade de João Pessoa

Com base nos dados dos mapas de TRM (°C), WSPEED (m/s) e parâmetros humanos do estudo de Andrade et al., (2016), elaborou-se o mapa do índice de conforto térmico PET (°C) da área urbana da cidade de João Pessoa. Este mapa é um arquivo raster com 1119594 pixels, em que é apresentado o valor do índice de sensação térmica de espaços abertos urbanos, em uma escala de 10 x 10m. (Figura 37). Este mapa representa a variação espacial do índice para o dia 13/04/2020, às 16h UTC.

Cabe ressaltar que o índice PET (°C) não foi estimado para as regiões Unidades de Conservação, Zona de Amortecimento e áreas rurais, já que a proposta desta pesquisa é avaliar as áreas urbanizadas.

Figura 37 - Mapa de PET (°C) da área urbana de João Pessoa - 13/04/2020 às 16h UTC.



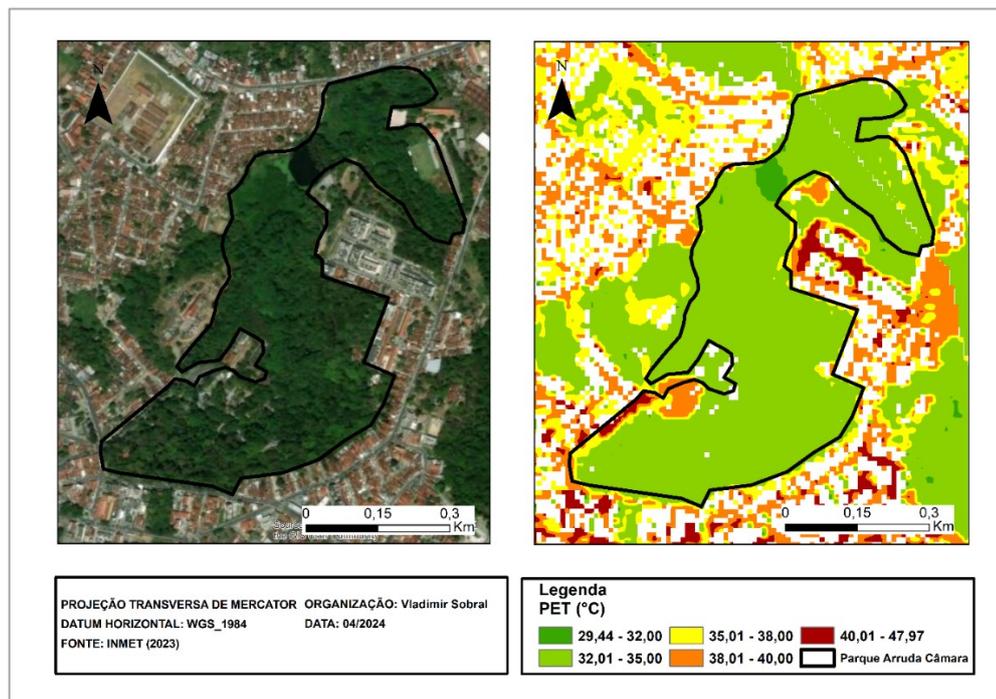
Fonte: Elaborado pelo Autor

### 7.3.3. Análise estatística descritiva dos dados do mapa de PET (°C)

Os resultados da estatística descritiva aplicada aos dados do mapa mostram um valor médio de 32,61 °C, mediano de 31,88° C e desvio padrão de  $\pm 2,50$  °C. Os valores máximo e mínimo foram de 41,95 °C e de 26,98 °C, respectivamente, o que resulta em uma amplitude térmica de 15,06 °C. Em uma primeira análise prévia não-quantitativa, baseada apenas na observação do mapa, nota-se que regiões a leste, sudeste e sul da cidade apresentaram baixos valores de PET (°C), menores que 32 °C. Isto decorre tanto pelo efeito dos baixos valores de T2 nestas regiões (Figura 28) quanto pelas características de superfície, entre elas o baixo adensamento urbano e a maior presença de vegetação, que favorecem a redução dos valores de PET (°C). As demais áreas da cidade mostram uma grande variabilidade do índice.

Os baixos valores de PET (°C) em áreas verdes representados no mapa podem ser confirmados por pesquisa realizada por Lima et al. (2019) na cidade de João Pessoa, que avaliou o conforto térmico de visitantes do parque zoológico Arruda Câmara (Figura 38). Os autores concluíram que os valores calculados de PET (°C), entre os horários 09:00 e 17:00 (horário local), estiveram dentro da faixa 24 – 34 °C. Os resultados do mapa de PET (°C) indicaram um valor médio para o parque de 32,45 °C para o horário da análise.

Figura 38 - Imagem aérea do parque Arruda Câmara e fração do Mapa de PET (°C).



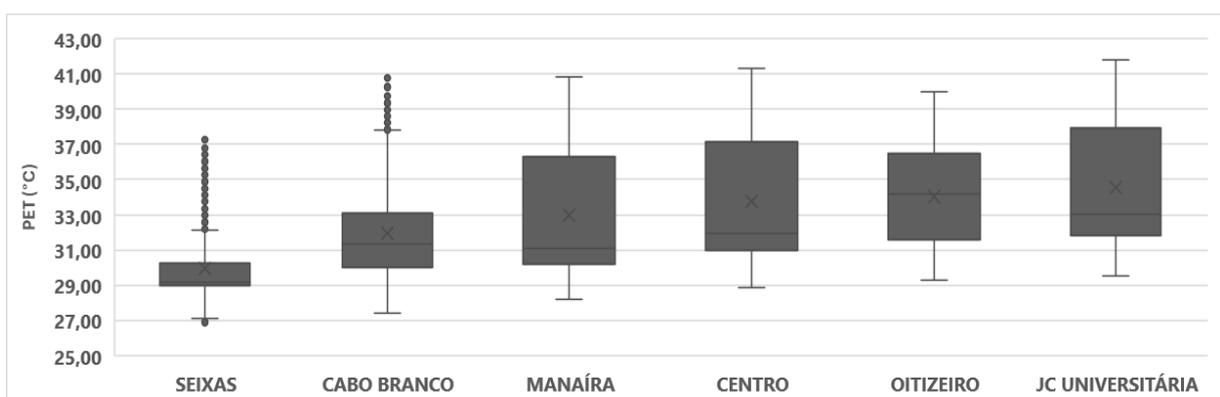
Fonte: Adaptado do Basemap ESRI (2021).

Ao se avaliar os valores médios de PET (°C) por bairros, observa-se um aumento dos valores do índice com o aumento da distância em relação a orla marítima. Bairros contíguos ao oceano, localizados a sudeste da cidade e com predomínio áreas verdes, registram os menores valores médios de PET (°C) (< 31 °C). Podem ser citados os bairros Ponta do Seixas, Penha e Barra de Gramame, com valor médio e desvio padrão de 29,94 °C e  $\pm 1,91$  °C, 30,13 °C e  $\pm 1,70$  °C e 30,46 °C e  $\pm 1,03$  °C, respectivamente. Porém, em regiões a sudeste da cidade, em que o adensamento urbano, verticalização dos edifícios e a impermeabilização do solo tornam-se dominantes, os bairros litorâneos apresentaram valores médios de PET (°C) entre 31 °C e 34 °C. Citam-se os bairros Cabo Branco, Manaíra e Bessa, com valores médios e  $\pm$  desvio padrão de 31,92 °C e  $\pm 2,51$  °C, 32,76 °C e  $\pm 2,54$  °C e 33,35 °C e  $\pm 2,8$  °C, respectivamente.

Os maiores valores médios do índice por bairros (> 34 °C) foram obtidos em distintas regiões da cidade. Podem ser citados os bairros Jardim Cidade Universitária, Expedicionários e Oitizeiro, com valores médios e  $\pm$  desvio padrão de 34,71 °C e  $\pm 2,59$  °C, 34,24 °C e  $\pm 2,86$  °C e 34,03 °C e  $\pm 2,61$  °C, respectivamente. Interessante notar que são bairros com características bem díspares, tanto em termos morfológicos urbanos quanto em termos socioeconômicos.

Outro aspecto que pode ser destacado refere-se à variação dos valores de PET (°C) a depender do predomínio do tipo de solo. Como pode ser visto na Gráfico 9, bairros com grandes áreas verdes, como é o caso de Ponta do Seixas e Cabo Branco, mostram uma menor dispersão dos dados dentro do intervalo interquartil e presença de outliers. De modo oposto, bairros com alto adensamento urbano mostraram uma maior dispersão dos dados, como é o caso dos bairros Manaíra, Centro e Oitizeiro.

Gráfico 10 - *Box plot* de bairros da cidade em função do índice PET (°C).



### 7.3.4. Relação entre o índice PET (°C) e os parâmetros urbanos

As informações provenientes do mapa de PET (°C) foram avaliadas com base nos dados dos cinco parâmetros urbanos descritos no Capítulo 6 (FVC, ÁREA, ALTURA, VOLUME E VEGETAÇÃO), com o propósito de se compreender a força de associações entre as variáveis.

Aplicou-se o teste de normalidade de Shapiro Wilk para verificar se os dados apresentavam uma distribuição Gaussiana. Os resultados indicaram que todos os parâmetros urbanos, inclusive a variável PET (°C), apresentaram uma distribuição não-normalizada de dados (com p-value < 0,05). Neste caso, a avaliação de correlação entre as variáveis foi realizada por meio do teste de correlação linear de Spearman ( $\rho$ ), que não exige dados paramétricos. Na Tabela 16 podem ser vistos os resultados deste teste.

Tabela 16 - Resultado do teste de correlação de Spearman entre as variáveis.

	PET	FVC	ÁREA	ALTURA	VOLUME	VEGETAÇÃO
PET	1,0					
FVC	-0,19515	1,0				
ÁREA	0,63197	-0,3338	1,0			
ALTURA	0,40093	-0,48818	0,55344	1,0		
VOLUME	0,57065	-0,41901	0,86346	0,77073	1,0	
VEGETAÇÃO	-0,59142	0,11405	-0,71000	-0,41842	-0,65049	1,0

Fonte: Elaborado pelo autor

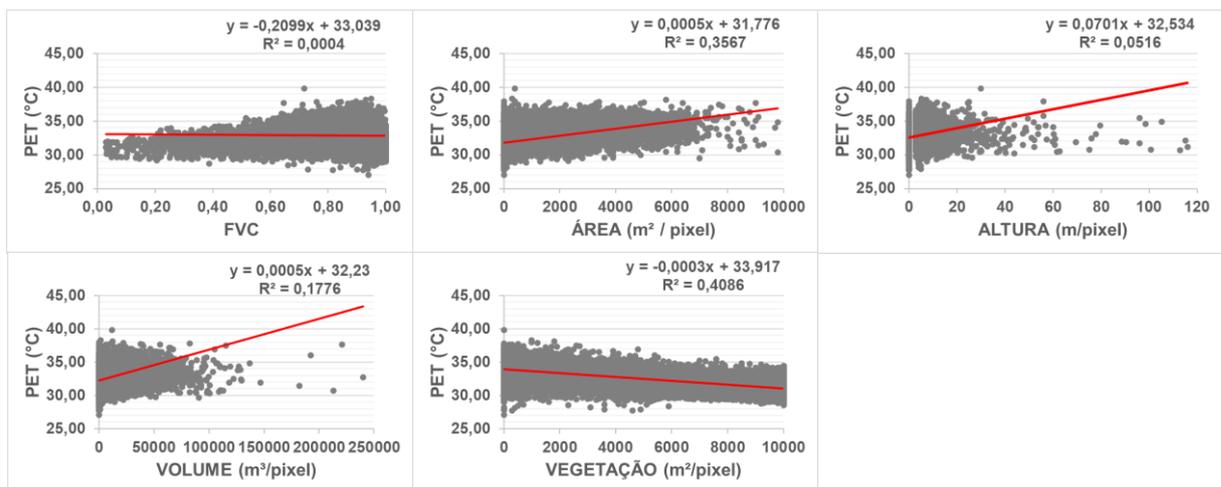
Observou-se que o índice PET (°C) apresentou uma correlação nula com a variável FVC (-0,19515), o que indica que não há associação entre estas duas variáveis. Uma correlação positiva fraca foi obtida com a variável ALTURA (0,40093) e uma correlação negativa moderada foi encontrada com a variável VEGETAÇÃO (-0,59142), o que demonstra que o aumento dos valores desta variável pode levar a uma redução dos valores de PET (°C). Com as variáveis ÁREA e VOLUME, a correlação foi positiva moderada (0,63197 e 0,57065, respectivamente), que demonstra que os valores de PET (°C) podem elevar-se com o aumento destas duas variáveis.

O FVC mostrou correlação nula com a variável VEGETAÇÃO (0,1145) e correlação negativa fraca com todas as variáveis relacionadas às edificações. As variáveis ÁREA e ALTURA mostraram uma correlação forte positiva com a variável VOLUME (0,86346

e 0,77073, respectivamente). Este resultado era esperado, visto que a variável VOLUME depende dos valores das duas outras variáveis. Por fim, a variável VEGETAÇÃO mostrou uma correlação negativa moderada com a variável ÁREA (-0,71), o que indica que o aumento da área construída implica na redução de áreas verdes.

Após a avaliação da correlação entre as variáveis, examinou-se a relação entre o índice PET (variável dependente) e os demais parâmetros urbanos (variáveis independentes) no software ArcGIS por meio da ferramenta *Exploratory Regression*, que utiliza a técnica de Regressão Linear Simples. Todas as análises retornaram com baixos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), resultado de uma grande dispersão dos dados e presença de outliers (Figura 39).

Figura 39 - Gráficos de dispersão da regressão entre o índice PET (°C) e parâmetros urbanos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar destes baixos valores, as variáveis ÁREA e VEGETAÇÃO obtiveram valores de  $R^2$  de 0,3566 e 0,4086, respectivamente, o que indica que a variabilidade destas duas variáveis foram as que melhor explicaram a variabilidade da variável PET (°C). Um fator que pode explicar estes resultados é a unidade de medida destas variáveis, visto que dos cinco parâmetros urbanos, ÁREA E VEGETAÇÃO são os únicos bidimensionais e, portanto, tem menores possibilidades de arranjos espaciais dentro de um mesmo pixel de grade. Desse modo, há uma menor variabilidade para os valores destas duas últimas variáveis para um mesmo valor de PET (°C).

Os demais resultados dos indicadores da função *Exploratory Regression* são demonstrados na Tabela 17. Os valores de AICc mostram que o modelo que melhor se adequou a variabilidade da variável PET (°C) foi o da variável VEGETAÇÃO, que

obteve o menor valor deste critério. O teste de Jarque-Bera (JB) mostrou que os resíduos do modelo não apresentam uma distribuição normal, uma vez que os valores de JB foram inferiores a 0,10. Por fim, o teste de autocorrelação espacial Índice Global de Moran (SA) indica que os resíduos estão autocorrelacionados no espaço. Pode-se presumir, portanto, que o método de regressão linear simples não deve ser capaz de explicar e quantificar as relações entre as variáveis devido a ocorrência agrupamentos espaciais.

Tabela 17 - Resultado do relatório *Exploratory Regression* para as variáveis independentes.

Parâmetro	R <sup>2</sup>	AdjR <sup>2</sup>	AICc	JB	MaxVIF	SA
<b>FVC</b>	0,0004	0,0003	57621,7367	0,0000	1,0000	1,0000
<b>ÁREA</b>	0,3567	0,3566	51029,5918	0,0000	1,0000	1,0000
<b>ALTURA</b>	0,0516	0,0553	56775,3903	0,0000	1,0000	1,0000
<b>VOLUME</b>	0,1776	0,1955	54372,0210	0,0000	1,0000	1,0000
<b>VEGETAÇÃO</b>	0,4086	0,4086	49769,2307	0,0000	1,0000	1,0000

Legenda: R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação; AdjR<sup>2</sup> = R<sup>2</sup> ajustado; AICc - critério de informação de Akaike; JB - Estatística Jarque-Bera; MaxVIF - Fator de inflação de variância máxima; SA - Autocorrelação espacial residual

Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.3.5. Análise exploratória espacial aplicada às variáveis de estudo

Nesta seção são apresentados os resultados da análise exploratória espacial com base nos índices global e local de Moran. O índice global de Moran foi obtido com o critério de vizinhança *Contiguity Edges Only*, que apresentou melhores resultados comparado ao critério *Inverse Distance*. Os valores positivos do I de Moran obtidos para cada uma das seis variáveis mostram que, de fato, há uma correlação direta das variáveis no espaço.

Com este resultado, é necessário ainda estabelecer sua validade estatística (Druck et al., 2004). Isto foi automaticamente realizado no software ArcMap, ao associar o valor do índice a uma distribuição normal por meio do teste de pseudo-significância. Com base nos valores de z-score e de p-value obtidos para cada parâmetro, pode-se concluir que há menos de 1% de probabilidade de que os padrões de agrupamento das variáveis possa ser um resultado da casualidade (Tabela 18).

Tabela 18 - Sumário do índice global de Moran

<b>Parâmetro</b>	<b><i>I de Moran</i></b>	<b><i>z-score</i></b>	<b><i>p-value</i></b>
PET	0,556974	95,719929	0,000000
FVC	0,617782	105,917983	0,000000
AREA	0,726038	124,453610	0,000000
ALTURA	0,599884	102,891767	0,000000
VOLUME	0,564287	97,063281	0,000000
VEGETAÇÃO	0,767833	131,617086	0,000000

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados obtidos com o índice global de Moran, realizou-se a identificação de possíveis *clusters* e *outliers* para cada variável com a aplicação do método Índice Local de Moran. Na Figura 40 podem ser vistos cartogramas dos *clusters* e *outliers* de cada variável avaliada.

A variável FVC apresentou tanto *clusters high-high* (1052) quanto *clusters low-low* (1664) e um número baixo de outliers (07 no total). Os *clusters high-high* representam 7,02% da área de estudo e concentraram-se em áreas sem a presença de edificações, em que os valores de FVC foram próximos a 1. Os *clusters low-low* estão localizados, predominantemente, em grandes áreas arborizadas que reduzem a visibilidade à abóbada celeste, aproximando os valores da variável FVC de 0. O grande número de regiões classificadas como *not significant* indicam uma grande heterogeneidade da relação H/W das edificações, ao longo de todo o território, o que impediu a formação de clusters (Figura 40a).

Conforme apresentado na Figura 40b, a variável ÁREA apresentou tanto *clusters high-high* (2466) quanto *clusters low-low* (2827) e poucos outliers (04 no total). Os agrupamentos *high-high* estão concentrados, principalmente, nas regiões norte, central e sul da cidade e representam 16,46% da área de estudo. Estas são regiões classificadas pelo Plano de Macrozoneamento da PMJP como Áreas de Adensamento Prioritário (AAP), logo os índices urbanísticos destas regiões favorecem uma maior ocupação do território. Os agrupamentos *low-low* estão localizados em áreas com poucas ou nenhuma edificação, concentrando-se nas regiões sudeste e sul da cidade.

A variável ALTURA apresentou apenas *clusters high-high* (1131), que se localizam, predominantemente, nas regiões leste, nordeste e noroeste da cidade, e totalizam 7,55% da área urbana (Figura 40c). Este resultado indica uma forte verticalização da área litorânea da cidade, principalmente nos bairros Jardim Oceania, Manaíra,

Tambaú, Cabo Branco. Apenas 23 outliers foram identificados em toda a área de estudo. As demais regiões urbanas foram classificadas como *not significant*, o que totalizou 92,28% do território urbano.

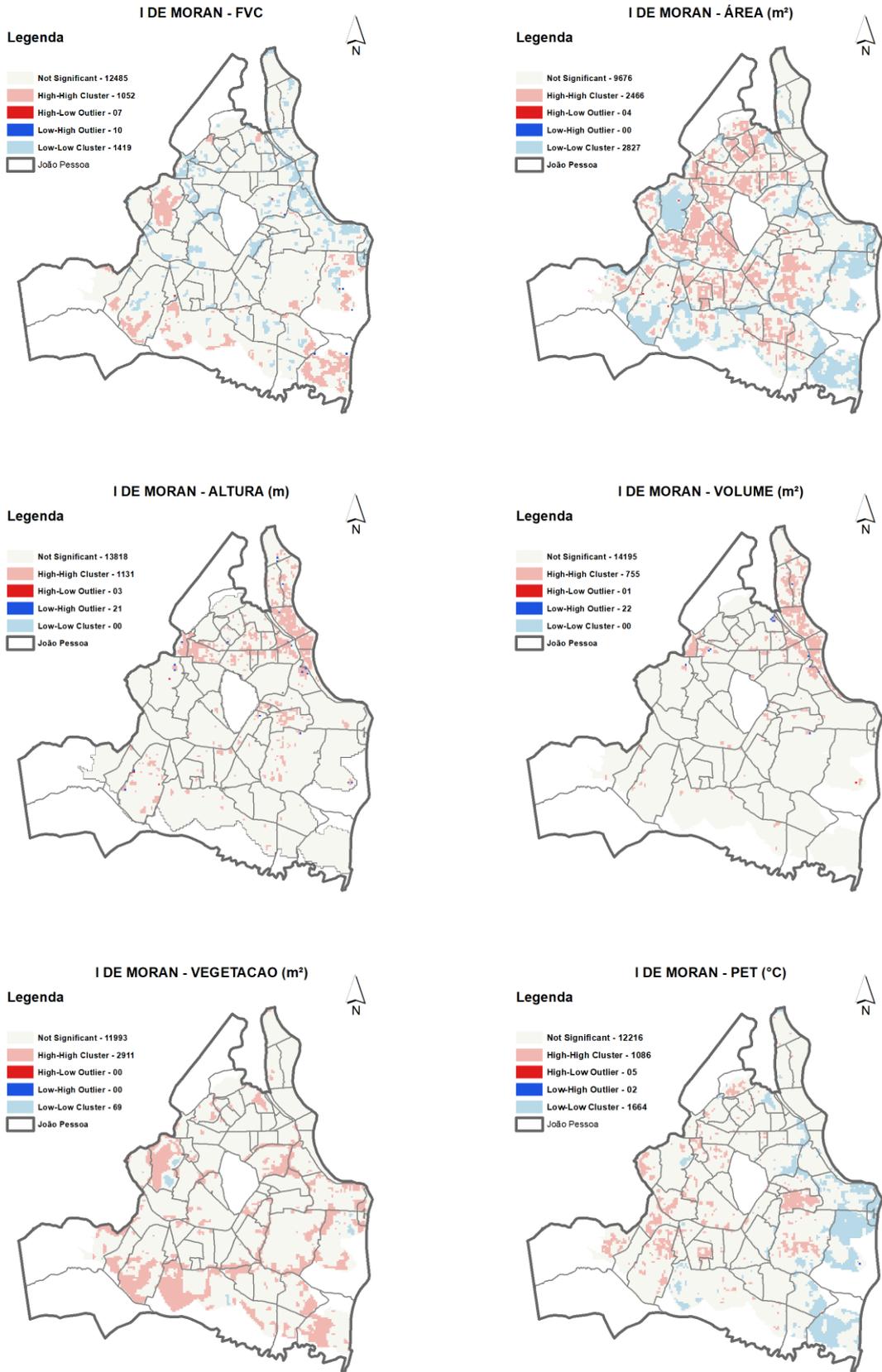
Quanto à variável VOLUME, houve um predomínio de áreas classificadas como *not significant*, que totalizaram 94,80% da área de estudo (Figura 40d). As maiores concentrações de *clusters high-high* (755) estão localizadas nas regiões nordeste e noroeste da cidade. Contudo, podem ser vistas pequenas concentrações destes *clusters* em bairros da região central e sul. Este tipo de agrupamento está presente em 5,04% da área urbana da cidade. Foram identificados apenas 23 outliers e não houve *clusters low-low*.

A variável VEGETAÇÃO apresentou agrupamentos classificados como *high-high* (2911) localizados em áreas com predomínio de cobertura vegetal (Figura 40e). Estes agrupamentos representam 19,44% da área urbana. Os poucos *clusters* classificados como *low-low* representam áreas sem nenhuma vegetação (tanto rasteira como arbórea), como por exemplo corpos d'água e solo exposto. As regiões classificadas como *not significant* foram predominantes e abrangem 80,10% da área urbana. Com este elevado percentual desta última classe pode-se concluir que as áreas verdes estão muito fragmentadas ao longo de toda a área urbana.

Por fim, os resultados da variável PET (°C) mostraram que os *clusters high-high* representam 7,25% da área de estudo e apresentaram um valor médio de PET (°C) de 35,53 °C, com valor máximo de 39,83 °C e mínimo de 34,15 °C (Figura 40f). Estes agrupamentos podem ser encontrados em, praticamente, todo o território, porém concentrados em bairros com a presença de *clusters high-high* da variável ÁREA e ausência de *clusters* da variável VEGETAÇÃO. Como exemplo, podem ser citados os bairros Jardim Cidade Universitária, Mangabeira, Alto dos Mateus e Indústrias.

Interessante notar que regiões com alta verticalização de edifícios não apresentaram *clusters* da variável PET (°C). Isto pode ser explicado pelo impacto das edificações de elevada altura na sensação térmica de seu entorno imediato. Observou-se que altos valores de PET (°C) foram encontrados em áreas próximas a fachadas de edificações orientadas para o sol. De modo oposto, baixos valores de PET (°C) foram encontrados em áreas sob o efeito do sombreamento dos edifícios. Deste modo, a grande heterogeneidade de valores de PET (°) inviabilizou a formação de *clusters*.

Figura 40 - Cartogramas de I de Moran dos cinco parâmetros urbanos e do índice PET.



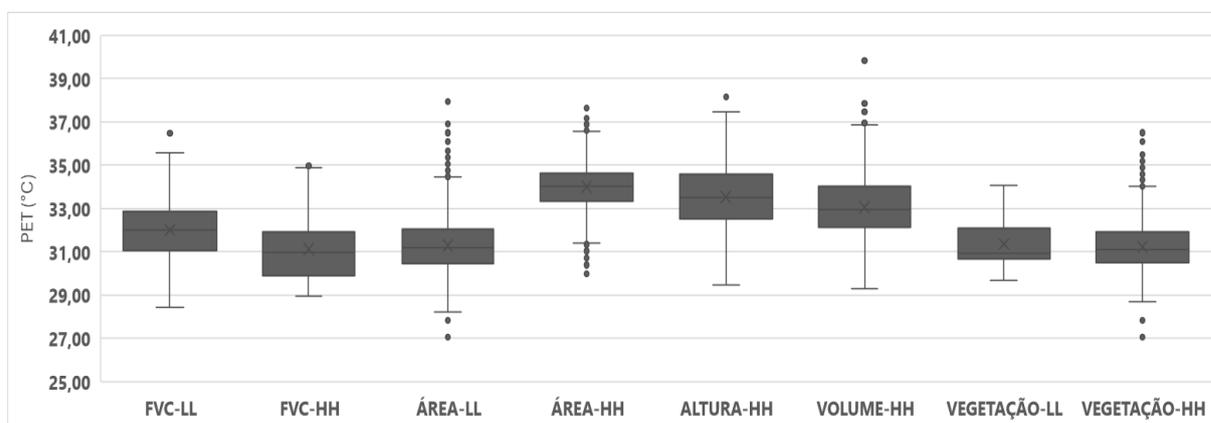
Fonte: Elaborado pelo autor

Os *clusters low-low* da variável PET (°C) estão presentes, majoritariamente, nas regiões leste e sudeste da cidade, em que há predominância de vegetação rasteira e arbórea. Nos bairros Castelo Branco, Portal do Sol, Costa do Sol e Barra de Gramame podem ser encontrados estes tipos de cluster. Estes agrupamentos representam 11,11% da área de estudo e apresentaram um valor médio de 30,07 °C, com um valor máximo de 32,35 °C e mínimo de 27,05 °C.

Uma vez definidos os *clusters* dos parâmetros urbanos, foi possível elaborar uma estatística descritiva da variável PET (°C) em cada um destes agrupamentos (Gráfico 10). Os parâmetros urbanos relacionados às edificações apresentaram tanto os maiores valores médios quanto os medianos associados a variável dependente PET (°C), no que diz respeito ao *cluster high-high*. A variável ÁREA apresentou valor médio de 34,02 °C e mediano de 34,04 °, a variável ALTURA apresentou valor médio de 33,54 °C e mediano de 33,49 ° e a variável VOLUME apresentou valor médio de 33,06 °C e mediano de 32,96 °C. O maior valor limite superior do gráfico *box plot* foi obtido pela variável ALTURA, com 37,46 °C, seguido da variável VOLUME, com 36,88 °C, e da variável ÁREA, com 36,54 °C.

A variável VEGETAÇÃO obteve os menores valores médios e medianos associados à variável PET (°C), quanto ao *cluster high-high*. Foi registrado um valor médio foi de 31,13 °C e mediano de 31,05 °C para esta variável. O menor valor limite superior foi também registrado nesta variável, com 33,17 °C. Interessante notar que os *cluster high-high* da variável FVC e o *low-low* da variável ÁREA mostram uma variabilidade semelhante ao *cluster high-high* da variável VEGETAÇÃO. Isso ocorre porque estes clusters também identificam áreas verdes, logo os valores são similares.

Gráfico 11 - *Box plots* do índice PET (°C) por clusters dos parâmetros urbanos



Fonte: Elaborado pelo autor

Com os valores de PET (°C) obtidos nestes agrupamentos poder-se-ia concluir que as regiões com alto adensamento urbano e verticalização apresentam valores médios superiores a áreas verdes em pelo menos 2,31 °C. Contudo, é preciso lembrar que os agrupamentos, de qualquer variável, localizam-se ora em regiões litorâneas, que se beneficiam de menores valores de T2, ora em regiões mais ocidentais, onde os valores de T2 são maiores. Esta diferença nos valores de T2 impacta os valores de PET (°C). Desse modo, ao isolar uma determinada região de análise, as diferenças associadas aos valores de PET entre os parâmetros urbanos podem ser ainda maiores.

### **7.3.6. Impacto das LCZs nos valores de PET (°C)**

No Gráfico 11 é apresentado o impacto das LCZs nos valores do mapa de PET (°C) segundo as classes *Build Types* e *Land Cover Types*. Os resultados mostraram que a LCZ10 apresentou os maiores valores médios e medianos de PET (°C) entre todas as classes. Contudo, trata-se de uma LCZ com baixa representatividade espacial, constituída apenas por uma fábrica de cimento localizada na zona oeste da cidade. Dentre as demais classes *Build Types*, destaca-se a LCZ3 que obteve os maiores valores médios e medianos (34,22 °C e 35,24 °C, respectivamente).

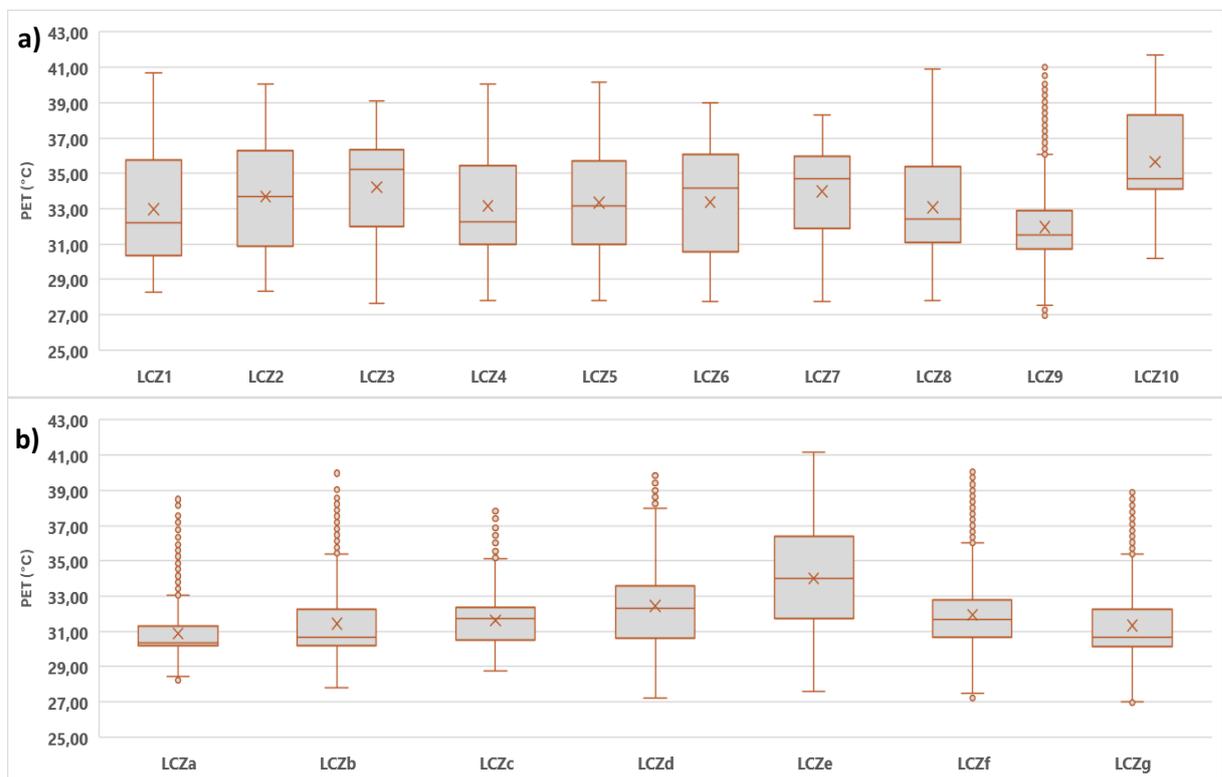
É interessante notar que, conforme a redução da altura dos edifícios tanto nas classes *compact rise* (LCZs 1, 2 e 3) quanto nas classes *open rise* (LCZs 4, 5 e 6) há um aumento dos valores de PET (°C). Isto pode ser atribuído aos efeitos de sombreamento causados pelos edifícios, conforme mencionado anteriormente. Este fato também pode explicar os elevados valores de PET na classe LCZ7, que representa áreas de assentamentos informais geralmente caracterizadas por moradias populares improvisadas de baixa altura. Os valores médios e medianos registrados em LC7 foram apenas inferiores a LCZ10 e LCZ3. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por OBE et al. (2024), que encontraram valores elevados do índice de estresse térmico humidex para a classe LCZ7 em Lagos, Nigéria.

Em relação à amplitude dos valores de PET na mesma LCZ do grupo *Build Types*, nota-se que em todas as classes (exceto a LCZ9), a amplitude térmica foi superior a 11,00 °C, atingindo valores máximos acima de 38,80 °C. Isso pode ser explicado pelo modelo de ocupação urbana de João Pessoa em que há, historicamente, uma grande diversidade de uso e ocupação do solo em todo o território, reflexo de uma

urbanização desordenada e desvinculada das condições climáticas locais (SILVA, 1999; CARVALHO, 2006; SOUZA, KATZSCHNER, 2018).

Entre as classes *Land Cover Types*, a LCZa obteve os menores valores médios e medianos (30,86 °C e 30,33 °C, respectivamente) e a LCZe obteve os maiores valores médios e medianos (34,01 °C e 34,03 °C, respectivamente). Observa-se que o valor médio e mediano do PET (°C) aumenta com a redução da arborização (classes LCZa, LCZb e LCZc), o que pode ser explicado pelo efeito atenuante do sombreamento das árvores sobre a sensação térmica local. Surpreendentemente, a LCZf obteve valores médios e medianos de PET (°C) mais baixos que a LCZd. Atribui-se este resultado aos baixos valores de PET (°C) obtidos ao longo das regiões de praia, que se beneficiaram dos maiores valores de WSPEED (m/s) e menores valores de T2 (°C).

Gráfico 12 - Box plots dos valores de PET segundo classes de LCZs.



a) *Buid Types* e b) *Land Cover Types*.

Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.3.7. Áreas urbanas segundo faixas de estresse térmico

Nesta seção são apresentados os resultados da identificação de áreas urbanas da cidade de João Pessoa, com base no intervalo de sensação térmica proposto por Andrade et al. (2016). Adicionalmente, são apresentados os resultados estatísticos de

PET (°C) por setor censitário que embasarão o cálculo do quantitativo de população exposta ao calor.

O resultado da avaliação mostrou que não houve áreas urbanas classificadas na faixa de sensação térmica Conforto ( $\leq 26,8$  °C), ou seja, praticamente toda a área de estudo apresentou algum grau elevado de estresse térmico (Quadro 11). As áreas urbanas classificadas na faixa de Pouco Calor (entre 26,8 °C e 29,40 °C) representam 4,41% de toda a área de estudo. Essas áreas estão localizadas em regiões com baixos valores de T2 (°C) e cobertura de solo do tipo gramínea, além de serem sombreadas por árvores ou grandes construções que impedem a chegada da radiação solar direta.

Regiões classificadas na faixa Calor (entre 29,40 °C e 34,10 °C) foram encontradas em todo o território e representam 67,61% da área avaliada. Observou-se que, geralmente, são áreas abertas, sujeitas a incidência da radiação solar direta, com solo tipo grama ou solo exposto ou áreas próximas a áreas pavimentadas. Por fim, as áreas classificadas na faixa de sensação térmica Muito Calor ( $\geq 34,10$  °C) representam 27,95% do território avaliado e estão localizadas, em sua maioria, em áreas pavimentadas expostas à radiação solar direta, como vias de tráfego urbano, grandes áreas de estacionamento e espaços com uma superfície impermeável. Os bairros que se destacaram pelo grande percentual de áreas classificadas na faixa de extremo estresse positivo foram: Jardim Cidade Universitária, Jaguaribe, Alto do Céu, Mangabeira, Oitizeiro, Jardim Veneza e Mumbaba.

Quadro 11 - Percentual de áreas urbanas com base no intervalo de sensação térmica.

<b>Estresse fisiológico</b>	<b>Não há estresse térmico</b>	<b>Moderado estresse positivo</b>	<b>Forte estresse positivo</b>	<b>Extremo estresse positivo</b>
<b>Sensação térmica</b>	<b>Conforto</b>	<b>Pouco Calor</b>	<b>Calor</b>	<b>Muito Calor</b>
<b>Intervalos de PET (°C)</b>	<b><math>\leq 26,8</math></b>	<b>26,8 – 29,40</b>	<b>29,40– 34,10</b>	<b><math>\geq 34,10</math></b>
<b>Percentual de área (%)</b>	0,00	4,44	67,61	27,95

Fonte: Adaptado de Andrade et al. (2016).

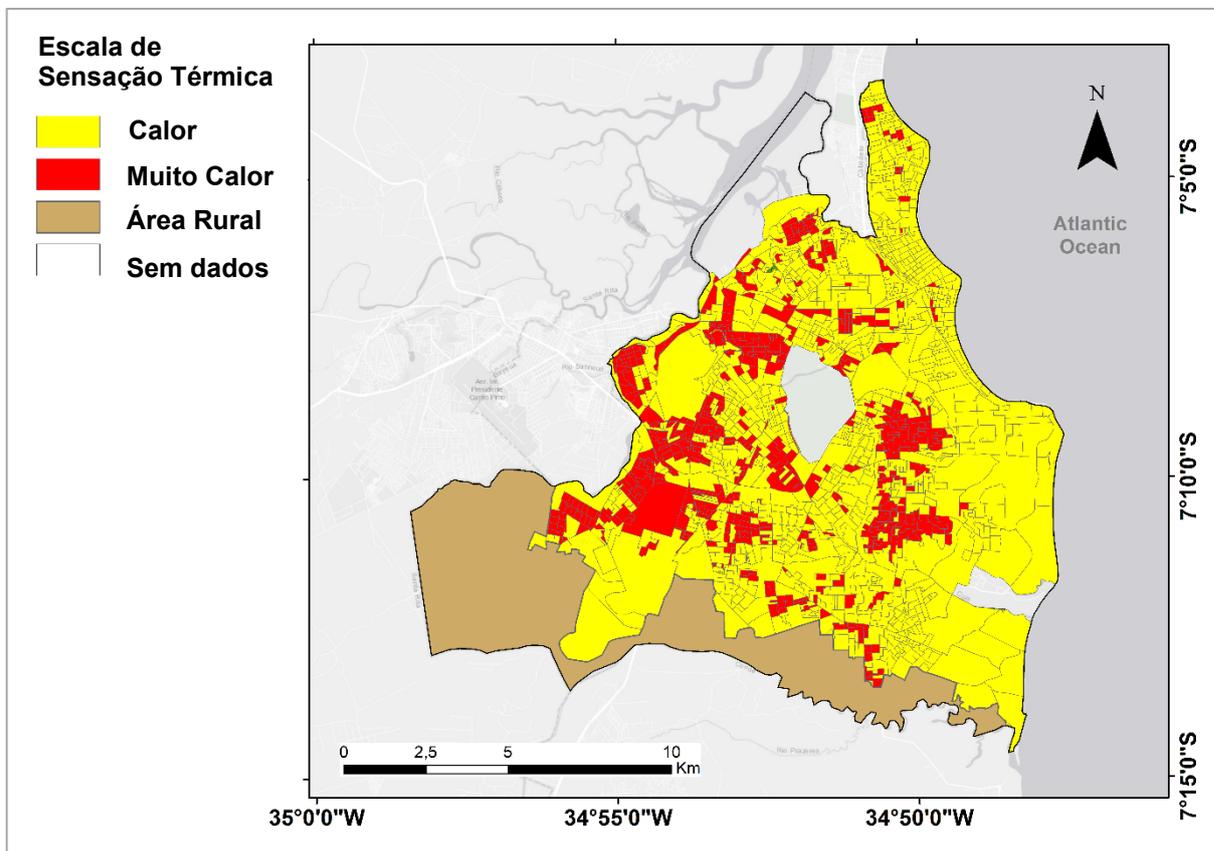
Ainda em relação às áreas classificadas na faixa de sensação térmica Muito Calor, identificou-se que as regiões com valores acima de 38,10 °C localizam-se a sotavento de edifícios com mais de 10 pavimentos. Isto pode ser explicado pelo efeito combinado do aumento do TRM (°C), resultante da reflexão da radiação solar direta causada pelas fachadas voltadas para o sol, associado à redução da WSPEED (m/s)

decorrente da obstrução dos edifícios. Estas duas características em escala microclimática induziu o aumento dos valores do PET ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Quanto aos resultados estatísticos dos valores de PET ( $^{\circ}\text{C}$ ) por setor censitário, obteve-se um valor mínimo de  $29,78^{\circ}\text{C}$ , máximo de  $36,75^{\circ}\text{C}$ , médio de  $33,54^{\circ}\text{C}$  e desvio padrão de  $\pm 1,16^{\circ}\text{C}$ . Com seus valores médios, os setores censitários foram classificados segundo as faixas de sensação térmica. Na Figura 41 é apresentado o mapa de setores censitários do município de João Pessoa classificados segundo as faixas de sensação térmica Calor e Muito Calor.

Verifica-se que há predominância de setores classificados na faixa Calor (forte estresse térmico positivo) em toda a cidade. Quanto aos setores classificados na faixa Muito Calor (elevado estresse térmico positivo), há poucos localizados em áreas próximas ao oceano, como nos bairros Bessa, Jardim Oceania e Tambaú. Um maior agrupamento de setores classificados nessa faixa pode ser visto no restante da área urbana da cidade, em especial nas regiões central, sudeste e oeste da cidade, que abrigam bairros populares, caracterizados por edifícios de até quatro andares, escassa arborização nas vias urbanas e predominância de solo impermeável.

Figura 41 - Mapa de Setores Censitários da cidade com as classes de sensação térmica.



Com a classificação dos setores censitários segundo as faixas de estresse térmico, quantificou-se a população exposta ao calor. Segundo os resultados da pesquisa, 544590 pessoas vivem em setores censitários classificados no intervalo de sensação térmica Calor, o que equivale a 65,42% da população urbana da cidade. No intervalo de sensação térmica Muito Calor foram identificadas 287877 pessoas, que representa 34,58 % da população urbana.

### **7.3.8. Considerações sobre os resultados da abordagem biometeorológica humana**

Quanto à análise dos dados do mapa de PET (°C), os resultados demonstram que praticamente toda a área urbana de João Pessoa esteve sob extremo estresse térmico positivo no momento da análise do episódio EVO2. O índice PET (°C) apresentou um valor mediano de 31,88 °C e uma amplitude térmica de 15,06 °C. Ao comparar a amplitude térmica do PET com a da temperatura do ar (T2), valor de 2,29 °C, pode-se concluir que, de fato, a T2 (°C) não pode ser a única variável a ser considerada em estudo de impacto de Onda de Calor na sensação térmica para a cidade de João Pessoa. Observou-se que áreas com baixos valores de T2 foram classificadas na faixa elevado estresse térmico devido a aspectos microclimáticos que elevaram o PET (°C).

Todos os bairros do município apresentaram valores médios de PET que os enquadram dentro da faixa de sensação térmica Calor, a exceção dos bairros jardim Cidade Universitária e Expedicionários que estão dentro da faixa Muito Calor. Porém vários bairros se destacaram com alto percentual de seu território classificados na faixa de sensação térmica Muito Calor. Desse modo, percebe-se que características de superfície desses bairros, como o ordenamento urbano proposto, o tipo de material de superfície e a escassez de áreas verdes estão promovendo elevado grau de estresse térmico a população em momentos de Onda de Calor.

A aplicação da técnica autocorrelação espacial em dados da pesquisa mostrou que a variável ÁREA apresentou valores médios e medianos de PET (34,02 °C e 34,04 °C, respectivamente) para os clusters *high-high*, valores muito próximos a faixa de sensação térmica Muito Calor. Isso indica que regiões com alto adensamento urbano acentuaram o estresse térmico ao calor. A variável VEGETAÇÃO obteve os menores valores médios e medianos de PET (31,13 °C e 31,05 °C, respectivamente) para os clusters *high-high*, porém ainda dentro da faixa de sensação térmica Calor. Com este resultado, observa-se que apesar dos efeitos atenuantes da vegetação na sensação

térmica em dias elevadas temperatura do ar, a Onda de Calor implica uma condição de estresse térmico positivo mesmo em áreas verdes. Assim, pode ser necessário a adoção de alertas à população da ocorrência de OC, já que mesmo os espaços verdes não conseguem atenuar totalmente o calor extremo das áreas urbanas da cidade.

Ao classificar a área urbana da cidade com as *Local Climate Zones*, os resultados demonstraram que as classes LCZ3 (áreas compactas de baixa altura), LCZ6 (áreas abertas de média altura), LCZ7 (assentamentos informais) e LCZ10 (áreas industriais) apresentaram valores medianos do índice PET dentro da faixa de sensação térmica Muito Calor. O emprego das LCZs na pesquisa também permitiu identificar que os valores PET são reduzidos com o aumento da altura das edificações. Atribui-se a este resultado o sombreamento provocado pelos edifícios, que reduziram os valores de TRM em áreas próximas às edificações.

Em uma análise de escala intraurbana, foram observadas algumas características comuns a quase todos os bairros da cidade que contribuíram para alcançar valores do índice PET acima de 39,00 °C. Áreas com solo do tipo pavimentado e alta concentração de edificações, com pouca ou nenhuma vegetação, tanto rasteira quanto arbórea, mostraram que podem impactar negativamente a sensação térmica. Para estas regiões foram constatados altos valores de TRM (°C), acima de 45 °C. Ademais, devido ao grande número de edifícios e maior proximidade entre eles, essas áreas promoveram uma alta rugosidade frente aos ventos, o que implicou a redução de sua velocidade inicial.

Os bairros verticalizados, principalmente com edifícios acima de 14 pavimentos, também apresentaram uma característica comum quanto a elevação do índice PET (°C). As regiões localizadas a sotavento dos edifícios altos mostraram altos valores de PET (°C), em geral acima de 40 °C. Ao menos dois aspectos podem explicar este efeito. O primeiro está relacionado a redução da velocidade dos ventos, causada pela obstrução do volume edificado. O modelo UMEP indicou valores menores da velocidade do vento em regiões a sotavento dos edifícios comparada as regiões a barlavento deles. O segundo aspecto está relacionado ao aumento da TRM (°C). Devido a posição do sol (azimute e altura solar) no momento da análise da sensação térmica, as fachadas a barlavento dos edifícios estavam voltadas para a chegada de radiação solar direta. Assim, estas áreas apresentam tanto uma exposição à radiação solar direta quanto a difusa, fruto da reflexão da radiação direta pelas fachadas a

sotavento. Com o aumento da TRM local e a redução da velocidade do vento, houve uma elevação dos valores de PET (°C).

Quanto às características urbanas que contribuíram para a redução dos valores de PET (°C), abaixo de 33 °C, podem ser citados espaços com a presença de áreas verdes, tanto vegetação rasteira quanto arbórea, e regiões a barlavento de edifícios altos, com 10 pavimentos ou mais. O efeito atenuante no desconforto térmico provocado pelas áreas verdes mostra a importância da vegetação rasteira e/ou da presença das árvores na redução do PET (°C), de acordo com os resultados do modelo UMEP. Ao considerar a cobertura de solo como tipo GRAMA em uma determinada região de análise, o modelo estimou um menor valor de TRM (°C), decorrente da redução da radiação solar difusa, e baixo impacto na velocidade dos ventos, consequência da baixa rugosidade superficial. No caso da presença de árvores na região de análise, o modelo estimou os efeitos do sombreamento provocado pelas copas, além da absorção da radiação solar direta pelas folhas, reduzindo a TRM (°C) local. Logo, nas duas situações, houve uma redução nos valores de PET (°C).

Para os espaços a barlavento dos edifícios altos, com mais de 10 pavimentos, foram observados menores valores de PET (°C) por duas razões. A primeira está relacionada diretamente ao sombreamento, que é a consequência do bloqueio da radiação solar direta provocado pelos edifícios em função da posição do sol na hora da análise. Este sombreamento, que tem uma área maior que o pixel do grid de análise (10 x 10 m), provocou a redução dos valores de TRM (°C). A segunda razão está relacionada a direção e velocidade dos ventos. Em geral, os espaços sombreados estavam localizados nas regiões a barlavento dos edifícios, que são áreas com menores obstruções aos ventos. Logo, os espaços a sombra dos edifícios altos foram beneficiados pelos menores registros de TRM (°C) e maiores valores da velocidade dos ventos (m/s), que contribuíram com a redução dos valores de PET (°C).

## 8. CONCLUSÃO

### Considerações finais

Esta pesquisa teve como propósito o estudo da variabilidade do estresse térmico humano na cidade de João Pessoa, avaliada pelo índice de conforto térmico PET ( $^{\circ}\text{C}$ ), em um momento de calor extremo decorrente de Onda de Calor. Para tanto, adotou-se uma abordagem interdisciplinar, a partir de fundamentos da Meteorologia, da Climatologia Urbana e da Biometeorologia Urbana, com o uso de ferramentas de modelagem numérica de mesoescala e microescala e de análise espacial. Na última seção desse trabalho serão discutidas as hipóteses sugeridas na tese, que direcionaram todos os objetivos e atividades desenvolvidas ao longo da pesquisa.

Considerando a série histórica de 2010 a 2023 e a definição de Onda de Calor empregada na pesquisa, que se utilizou do limiar combinado e de dados de temperatura máxima e mínima do ar das três estações meteorológicas da RMJP, a tese corrobora a primeira hipótese, enunciada como:

- *A cidade de João Pessoa apresentou episódios de Onda de Calor no período de 2010 a 2013, que podem ser caracterizados por valores extremos de temperatura máxima e mínima do ar.*

Os resultados da pesquisa demonstraram que a duração média dos eventos foi de 3,8 dias e a frequência média foi de 1,45 eventos por ano. Porém, observou-se que o maior número de eventos ocorreu a partir do ano de 2017, o que implica uma mudança da frequência média para 2,90 eventos por ano, dentro dos últimos sete anos da série histórica. A intensidade média das OC foi de 1,37  $^{\circ}\text{C}$ , o que revela um baixo impacto destes eventos na elevação da temperatura do ar local. Esta constatação foi confirmada pelas taxas de ascensão ( $^{\circ}\text{C}$ ) e taxa de declínio ( $^{\circ}\text{C}$ ), que indicaram que a variação diária da temperatura do ar sob ação das Ondas de Calor está dentro das flutuações da climatologia do período para a temperatura do ar.

Esses resultados podem indicar que associar apenas valores da temperatura do ar, decorrentes de episódios de Ondas de Calor, a dados de saúde da população da cidade, como o número de doenças cardiorespiratórias ou taxas de morbidade e de mortalidade, por exemplo, pode não ser suficiente para encontrar resultados significativos. É importante considerar que a população local pode apresentar uma maior tolerância às variações da temperatura do ar da cidade, decorrente de sua

adaptação às flutuações do clima local. Deve-se, portanto, considerar outros fatores que, concomitantemente aos elevados valores de temperatura, promovem o desconforto térmico local, como a alta carga térmica de espaços abertos e o regime de ventos intraurbano.

No que se refere as simulações de mesoescala, o modelo WRF reproduziu satisfatoriamente as flutuações diárias e a distribuição espacial das informações da temperatura do ar e umidade relativa do ar, dentro dos limites aceitáveis estipulados por Emery et al., 2001. Desse modo, extraíram-se os valores médios por bairros de variáveis climáticas em ambiente SIG na forma de planilha eletrônica e elaborou-se um arquivo com dados meteorológicos necessários às simulações das variáveis TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) e WSPEED (m/s) no modelo UMEP. Contudo, o modelo WRF superestimou os valores da velocidade do vento sobre o território de João Pessoa, comprometendo sua utilização como dado de entrada no modelo UMEP. Conclui-se, portanto, que os dados do modelo WRF podem ser utilizados em estudos que se utilizem de modelos microclimáticos para avaliar o clima urbano da cidade de João Pessoa, porém a sua aplicabilidade está fortemente associada à satisfatória reprodutibilidade das informações meteorológicas, que depende dos dados iniciais e de contorno do modelo, dos dados estáticos e, principalmente, dos esquemas de parametrizações físicas.

Quanto a modelagem em microescala, o mapeamento das variáveis TRM ( $^{\circ}\text{C}$ ) e WSPEED (m/s) em alta resolução espacial tornou-se possível a partir da obtenção de dados espaciais representativos da estrutura urbana da cidade, entre eles da topografia, da cobertura e uso do solo, da geometria e dimensão das edificações, da arborização urbana e da hidrografia. Esses dados foram extraídos de fontes públicas e tratados em ferramentas SIG. Após a obtenção dos dados meteorológicos, oriundos das simulações do WRF e de estações meteorológicas locais, foi possível a espacialização do índice PET em uma resolução espacial de 10 m no modelo UMEP.

Os dados do mapa revelaram uma elevada amplitude térmica do índice de conforto térmico sobre a área urbana da cidade ( $15,06^{\circ}\text{C}$ ), com um valor máximo de  $41,95^{\circ}\text{C}$ . Estes dados demonstram que durante um episódio de Onda de Calor, diferentes padrões de uso e ocupação do solo urbano de João Pessoa acentuaram o estresse térmico decorrente das elevadas temperaturas do ar. Apesar da pesquisa identificar uma grande concentração de áreas urbanas com o mais alto grau de desconforto

térmico nas regiões mais adensadas, com pouca vegetação e alta impermeabilidade do solo, observou-se que áreas a leste e sudeste da cidade, com predomínio da vegetação e/ou dos efeitos combinados do sombreamento e de maiores velocidades dos ventos, promoveram redução no calor extremo decorrente do episódio de Onda de Calor. Com esses resultados, esta tese não confirmou a segunda hipótese, descrita como:

- *Em dia de OC, as áreas urbanas com o mais alto grau de desconforto térmico, segundo o índice PET (°C), podem ser encontradas ao longo de todo o território da cidade;*

A análise horizontal da temperatura do ar (T2) a 2 m, simulada pelo modelo WRF, mostrou que a temperatura do ar aumentou com a distância em relação à orla marítima, consequência do ganho de calor pelo ar decorrente dos fluxos de calor sensível ( $W/m^2$ ) provenientes, principalmente, de áreas mais adensadas da cidade. Grande parte da região oeste e noroeste da cidade apresentaram os maiores valores médios de temperatura do ar por bairro, contudo outras regiões da cidade também apresentaram altos valores de estresse térmico positivo ( $PET \geq 34,10$  °C), como Jardim Cidade Universitária e Bairro das Indústrias. Isso indica que nestes bairros, o balanço energético da superfície urbana resultou em uma alta carga térmica, representada pelos altos valores da temperatura radiante média (°C), demonstrados no mapa de TRM (°C) . Adicionalmente, a configuração do ordenamento urbano e a dimensão e geometria das edificações desses bairros reduziu a velocidade dos ventos dentro dos cânions urbanos (em alguns casos até promoveu a estagnação dos ventos), o que induziu a um elevado estresse térmico positivo. Dado o exposto, ainda que a T2 seja uma variável de extrema importância na determinação da sensação térmica humana, apenas a distribuição da temperatura do ar não foi suficiente para indicar as regiões com os maiores graus de estresse térmico da população, durante episódio de Onda de Calor na cidade de João Pessoa. Diante desta constatação, conclui-se que esta tese confirmou a terceira hipótese sugerida, ainda de que de forma provisória, enunciada como:

- *Durante OC, as diferentes configurações da superfície urbana criam regiões únicas que promovem elevado estresse térmico positivo, independentemente de valores extremos de temperatura do ar.*

Com a identificação das regiões termicamente desconfortáveis, pôde-se quantificar a população exposta ao calor. De uma forma geral, um maior percentual da população urbana (65,42%) enfrenta um forte estresse térmico positivo durante o momento de calor extremo associado à Onda de Calor. No entanto, foram identificadas áreas específicas classificadas na faixa de elevado estresse térmico positivo, que abrigam 34,58% da população de João Pessoa. Como visto anteriormente, do ponto de vista do corpo humano, o calor extremo prolongado tem impacto direto na fisiologia humana, o que pode levar ao surgimento de doenças térmicas brandas, como a síncope e o edema por calor, ou a casos de emergência médica, com a desidratação e a hipertermia. Além disso, as áreas termicamente desconfortáveis podem induzir seus moradores a um maior consumo de energia elétrica para refrigeração dos ambientes internos, assim como a um maior consumo de água para irrigação e consumo humano.

Cabe, portanto, aos atores responsáveis pela produção do ambiente construído, como gestores públicos e profissionais da área da engenharia e arquitetura, utilizar informações climáticas da cidade para a formulação de diretrizes/índices urbanísticos e aplicação de estratégias arquitetônicas que tornem a cidade mais resiliente ao impacto do calor extremo na população da cidade de João Pessoa.

### **Limitações da pesquisa**

O mapeamento em escala de cidade em alta resolução espacial é algo que exige uma grande quantidade de informação espacial, principalmente em estudos que lidem com a modelagem atmosférica e climática urbana, logo este trabalho apresentou algumas limitações. Destas, duas podem ser destacadas: i) a pesquisa, ora apresentada, precisou utilizar-se de algumas generalizações, entre elas os valores de albedo e de emissividade dos materiais de superfície e das edificações. A identificação do albedo e da emissividade por ser feita por estudos de campo ou por sensoriamento remoto, porém qualquer umas destas ações demandariam um tempo maior para esta pesquisa, o que se tornou inviável. De toda forma, utilizaram-se valores de características térmicas dos materiais, reconhecidamente validados pela literatura científica; ii) o WRF é um modelo numérico complexo, que exige tanto uma grande quantidade de tempo para instalação e uso da ferramenta, quanto para as simulações atmosféricas. Os resultados do modelo dependem não apenas de parâmetros de configuração, mas também de um alto poder computacional, o que exige o uso de

máquinas específicas na maioria dos casos. Desse modo, o número de testes realizados para se obter uma melhor resposta do modelo precisou ser adaptado aos recursos da pesquisa, tanto no tempo disponível para a realização desta tese de doutorado quanto nos recursos referentes ao processamento computacional.

### **Sugestão para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros, sugere-se: i) o estudo de eventos extremos de calor que tenham ocorrido em outras estações do ano, para avaliar o impacto de diferentes condições atmosféricas e características urbanas no estresse térmico da população local, ii) testes no modelo WRF com diferentes esquemas de parametrizações físicas, para obter-se melhores resultados da validação do modelo, especialmente quanto a reprodutibilidade das condições de vento; e iii) avaliação de diferentes arranjos espaciais da cidade de João Pessoa, com o intuito de encontrar um ordenamento urbano com baixo impacto das Ondas de Calor na sensação térmica da população de João Pessoa.

## REFERÊNCIAS

- ADNAN, M. S. G. et al. Vulnerability of Australia to heatwaves: A systematic review on influencing factors, impacts, and mitigation options. **Environmental Research**, v. 213, p. 113703, out. 2022.
- AESA. **Elaboração dos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas litorâneas da Paraíba: plano de trabalho, 21001-ETP1-RP1-NS-00-01**. João Pessoa: AESA, 2021. Disponível em: <https://www.aesa.pb.gov.br/>. Acesso em: 10/05/2022.
- ALBUQUERQUE, T. T. A. et al. WRF-SMOKE-CMAQ modeling system for air quality evaluation in São Paulo megacity with a 2008 experimental campaign data. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 36, p. 36555–36569, dez. 2018.
- AMORIM, M. C. C. T. **Ilhas de calor em cidades tropicais de médio e pequeno porte: teoria e prática**. Curitiba. Editora Appris, 2021.
- ANDRADE, P. A. Verticalização em João Pessoa: produção do espaço e transformações urbanas. **Arquitextos**, São Paulo, n. 204.02, 2017. Disponível em: <https://www.vitruvius.com.br/>. Acesso em: 13/05/2022.
- ANDRADE, T. C. et al. (2016). Medição do conforto térmico em áreas públicas urbanas de Salvador-BA e calibração do índice de conforto PET usando a técnica árvore de decisão. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 4, n. 2, p. 278–296, 2016. DOI: <https://doi.org/10.9771/gesta.v4i2.16821>.
- ANJOS, M. et al. Sea Breeze Front and Outdoor Thermal Comfort during Summer in Northeastern Brazil. **Atmosphere**, v. 11, n. 9, p. 1013, 22 set. 2020.
- ARAÚJO, P. H. C. **Ensaio econômico sobre ondas de calor e seus impactos sobre a saúde no Brasil**. 2017. 247 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- ARKELL, B. P.; DARCH, G. J. C. Impact of climate change on London's transport network. In: **Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer**. Thomas Telford Ltd, 2006. p. 231-237.
- AWASTHI, A.; VISHWAKARMA, K.; PATTNAYAK, K. C. Retrospection of heatwave and heat index. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 147, n. 1–2, p. 589–604, jan. 2022.
- BARBIRATO, G. M. **Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos**. UFAL, 2007.
- BARBOSA, T. S. **Geomorfologia urbana e mapeamento geomorfológico do município de João Pessoa – PB, Brasil**. Dissertação - João Pessoa: UFPB, 2015.
- BARRY, ROGER G.; CHORLEY, RICHARD J. **Atmosphere, weather and climate**. Routledge, 2009.

BASARIN, B.; LUKIĆ, T.; MATZARAKIS, A. Review of Biometeorology of Heatwaves and Warm Extremes in Europe. **Atmosphere**, v. 11, n. 12, p. 1276, 26 nov. 2020.

BAUER, M. W.; GASKELL, G. **Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático**. Petrópolis: Vozes, 2017.

BERNARD, J.; LINDBERG, F.; OSWALD, S. URock 2023a: an open-source GIS-based wind model for complex urban settings. **Geoscientific Model Development**, v. 16, n. 20, p. 5703–5727, 16 out. 2023.

BEZERRA, I. L.; SANTOS, J. S.; AGUIAR, A. P. Ilhas de calor: importância da vegetação na amenização climática em João Pessoa-PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 5, p. 1499-1516, 2013..

BITENCOURT, D. P. et al. Frequência, duração, abrangência espacial e intensidade das ondas de calor no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 506–517, dez. 2016.

BITENCOURT, D. P. et al. The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 4, p. 2464–2478, 30 mar. 2020.

BOUGEAULT, PHILIPPE; LACARRERE, PIERRE. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta--scale model. **Monthly weather review**, v. 117, n. 8, p. 1872-1890, 1989.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil**. Brasília, 2016. 590 p.

BRUSE, M. ENVI-met 3.0: updated model overview. **University of Bochum**. Retrieved from: [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com), v. 3, 2004.

BUO, I. et al. High-resolution thermal exposure and shade maps for cool corridor planning. **Sustainable Cities and Society**, v. 93, p. 104499, jun. 2023.

BUSSONI, C. V. A.; MOREIRA, D. S.; MACHADO, J. P. Avaliação do Modelo WRF para Aplicação de um índice de Previsão de Geada na Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 3, p. 279-287, 2022.

ÇAĞLAK, S. Comparison of interpolation techniques used in Bioclimatic comfort maps and approach developed through Raster calculation model. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 10, n. 1, p. 799–808, fev. 2024.

CALVIN, K. et al. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 20 out. 2024.

CAMARGO, M. G.; FURLAN, M. M. D. P. Resposta fisiológica do corpo às temperaturas elevadas: exercício, extremos de temperatura e doenças térmicas. **Saúde e Pesquisa**, v. 4, n. 2, 2011.

CAMPBELL, S. et al. Heatwave and health impact research: A global review. **Health & Place**, v. 53, p. 210–218, set. 2018.

CARVALHO, A. N. M. **Avaliação e aplicação de esquema de dossel urbano no modelo meteorológico WRF**. 2019. 166 f. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2019.

CARVALHO, H. J. M. **Metodologia para a análise das interações entre a forma urbana e o clima: aplicação a uma cidade brasileira de clima litorâneo com baixa latitude**. 2006. 221 f. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Rio de Janeiro, 2006.

CECCHERINI, G. et al. Magnitude and frequency of heat and cold waves in recent decades: the case of South America. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 16, n. 3, p. 821–831, 21 mar. 2016.

CHAKRABORTY, T.; LEE, X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 74, p. 269–280, fev. 2019.

CHEN, F. et al. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 273–288, fev. 2011.

CHEN, Y.-C. et al. Modeling of mean radiant temperature based on comparison of airborne remote sensing data with surface measured data. **Atmospheric Research**, v. 174–175, p. 151–159, jun. 2016.

CHEVAL, S.; DUMITRESCU, A.; BELL, A. The urban heat island of Bucharest during the extreme high temperatures of July 2007. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 97, n. 3–4, p. 391–401, ago. 2009.

CHOW, W. T. L. et al. Seasonal dynamics of a suburban energy balance in Phoenix, Arizona: SUBURBAN ENERGY BALANCE DYNAMICS IN PHOENIX, AZ. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 15, p. 3863–3880, dez. 2014.

CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a central European city. **International Journal of Climatology**, v. 24, n. 11, p. 1395–1421, set. 2004.

COHEN, P.; POTCHTER, O.; MATZARAKIS, A. Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. **Building and Environment**, v. 51, p. 285–295, maio 2012.

DE BOECK, H. J. et al. Climatic characteristics of heat waves and their simulation in plant experiments. **Global Change Biology**, v. 16, n. 7, p. 1992–2000, jul. 2010.

DEMUZERE, M.; KITNER, J.; BECHTEL, B. LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 637455, 23 abr. 2021.

DILAWAR, A. et al. Evaluation the WRF Model with Different Land Surface Schemes: Heat Wave Event Simulations and Its Relation to Pacific Variability over Coastal Region, Karachi, Pakistan. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p. 12608, 15 nov. 2021.

DING, X. et al. A WRF-UCM-SOLWEIG framework for mapping thermal comfort and quantifying urban climate drivers: Advancing spatial and temporal resolutions at city scale. **Sustainable Cities and Society**, v. 112, p. 105628, out. 2024.

DINIZ, F. R. **Ondas de calor e a mortalidade de idosos por doenças respiratórias e cardiovasculares nas capitais dos estados brasileiros: uma análise no presente (1996-2016) e projeções para o futuro próximo (2030-2050) e futuro distante (2079-2099)**. 2022. 427 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

DINIZ, M. T. M.; DE OLIVEIRA, G. P. Proposta de compartimentação em mesoescala para o litoral do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 3, p. 565-590, 2016.

DOMEISEN, D. I. V. et al. Prediction and projection of heatwaves. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 4, n. 1, p. 36–50, 13 dez. 2022.

DONATTI, C. I. et al. Global hotspots of climate-related disasters. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 108, p. 104488, jun. 2024.

DU, S. et al. A review of multi-scale modelling, assessment, and improvement methods of the urban thermal and wind environment. **Building and Environment**, v. 213, p. 108860, abr. 2022.

DUBREUIL, V. et al. Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1446-1456, 2019.

EMERY, C. et al. Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 67, n. 5, p. 582–598, 27 abr. 2017.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. J. **Urban microclimate: designing the spaces between buildings**. 1st ed ed. London ; Washington, DC: Earthscan, 2011.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®**. Elsevier Brasil, 2017.

FEIGENWINTER, C. et al. Spatial Distribution of Sensible and Latent Heat Flux in the City of Basel (Switzerland). **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 8, p. 2717–2723, ago. 2018.

FERON, S. et al. Observations and Projections of Heat Waves in South America. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 8173, 3 jun. 2019.

FERREIRA, M. J. **Balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo**. 2010. 183 f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FIORILLO, E. et al. Diurnal Outdoor Thermal Comfort Mapping through Envi-Met Simulations, Remotely Sensed and In Situ Measurements. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 641, 29 mar. 2023.

FISCHER, E. M.; SIPPEL, S.; KNUTTI, R. Increasing probability of record-shattering climate extremes. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 8, p. 689–695, ago. 2021.

FOUNDA, D.; SANTAMOURIS, M. Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 10973, 8 set. 2017.

FREITAS, C. R.; GRIGORIEVA, E. A. A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 3, p. 487–512, mar. 2017.

FRÖHLICH, D.; GANGWISCH, M.; MATZARAKIS, A. Effect of radiation and wind on thermal comfort in urban environments - Application of the RayMan and SkyHelios model. **Urban Climate**, v. 27, p. 1–7, mar. 2019.

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, jun. 2020.

GARTLAND, L. M. **Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas**. London: Taylor & Francis Group, 2008.

GEIRINHAS, J. L. et al. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 1760-1776, 2018.

GEIRINHAS, J. L. et al. Characterizing the atmospheric conditions during the 2010 heatwave in Rio de Janeiro marked by excessive mortality rates. **Science of The Total Environment**, v. 650, p. 796–808, fev. 2019.

GEORGIADIS, T. Urban Climate and Risk. In: Oxford Handbooks Editorial Board (ed.). **Oxford Handbook Topics in Physical Sciences**. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, p. 1-29, 2017.

GIANNAROS, C. et al. The extreme heat wave of July–August 2021 in the Athens urban area (Greece): Atmospheric and human-biometeorological analysis exploiting ultra-high resolution numerical modeling and the local climate zone framework. **Science of The Total Environment**, v. 857, p. 159300, jan. 2023.

GOMES, HELBER BARROS et al. WRF Sensitivity for Seasonal Climate Simulations of Precipitation Fields on the CORDEX South America Domain. **Atmosphere**, v. 13, n. 1, p. 107, 2022.

GORELICK, NOEL et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.

GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 10, p. 5233-5250, 2014.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Heat Storage in Urban Areas: Local-Scale Observations and Evaluation of a Simple Model. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 7, p. 922–940, jul. 1999.

GULERIA, S.; GUPTA, A. K. Heat wave in India documentation of state of Telangana and Odisha (2016). **National Institute of Disaster Management, New Delhi**, v. 124, 2018.

GUO, H. et al. On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment, a critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109207, jan. 2020.

HAJAT, S.; KOSATKY, T. Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity. **Journal of Epidemiology & Community Health**, v. 64, n. 9, p. 753–760, 1 set. 2010.

HANSEN, A. et al. The Thermal Environment of Housing and Its Implications for the Health of Older People in South Australia: A Mixed-Methods Study. **Atmosphere**, v. 13, n. 1, p. 96, 8 jan. 2022.

HEBBERT, MICHAEL. Climatology for city planning in historical perspective. **Urban climate**, v. 10, p. 204-215, 2014.

HENGL, TOMISLAV et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS one**, v. 12, n. 2, p. e0169748, 2017.

HIRASHIMA, S. Q. D. S. et al. Thermal comfort comparison and evaluation in different climates. **Urban Climate**, v. 23, p. 219–230, mar. 2018.

HIRASHIMA, S. Q. S. **Percepção sonora e térmica e avaliação de conforto em espaços urbanos abertos do município de Belo Horizonte – MG, Brasil**. 2014. 246 f. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

HIRASHIMA, S. Q. S.; ASSIS, E. S.; NIKOLOPOULOU, M. Daytime thermal comfort in urban spaces: A field study in Brazil. **Building and Environment**, v. 107, p. 245-253, 2016.

HIRSCH, A. L.; KING, M. J. Atmospheric and Land Surface Contributions to Heatwaves: An Australian Perspective. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 17, p. e2020JD033223, 16 set. 2020.

HO, H. C. et al. Characterizing prolonged heat effects on mortality in a sub-tropical high-density city, Hong Kong. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 11, p. 1935–1944, nov. 2017.

HOBDAY, A. J. et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. **Progress in Oceanography**, v. 141, p. 227–238, fev. 2016.

HOLST, J.; MAYER, H. Impacts of street design parameters on human-biometeorological variables. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 20, n. 5, p. 541–552, 1 out. 2011.

HONG, S.-Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. **Monthly Weather Review**, v. 134, n. 9, p. 2318–2341, 1 set. 2006.

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, 25 out. 1999.

HUA, WENJIAN et al. High-resolution WRF simulation of extreme heat events in Eastern China: Large sensitivity to land surface schemes. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, p. 770826, 2021.

IACONO, M. J. et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D13, p. 2008JD009944, 16 jul. 2008.

IBGE. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 15/02/2023.

\_\_\_\_\_. **Tipologia intraurbana: espaços de diferenciação socioeconômica nas concentrações urbanas do Brasil**. / IBGE, Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro : IBGE, 2017. 164p.

IMRAN, H. M. et al. An evaluation of the performance of a WRF multi-physics ensemble for heatwave events over the city of Melbourne in southeast Australia. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 7–8, p. 2553–2586, abr. 2018.

INMET. **Glossário**. Brasília. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/glossario/glossario>>. Acesso em: 07/11/2023.

\_\_\_\_\_. **Normais Climatológicas 1991 - 2020**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acessado em: 15/02/2022.

JIMÉNEZ, J. D; GIL, C. L.; HERRERA, R. G. Impacto de las temperaturas extremas en la salud pública: futuras actuaciones. **Revista Española de Salud Pública**, v. 79, n. 2, p. 145-157, abr. 2005.

JOÃO PESSOA. Prefeitura Municipal. **Plano diretor da cidade de João Pessoa** Disponível em: <https://planodiretor.joaopessoa.pb.gov.br/>. Acesso em: 20/01/24.

\_\_\_\_\_. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. **Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica de João Pessoa**. João Pessoa: FEA Gráfica e Editora. 2012.

KÁNTOR, N.; UNGER, J. The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment — the mean radiant temperature. **Open Geosciences**, v. 3, n. 1, p. 90–100, 1 mar. 2011.

- KARRA, Krishna et al. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. In: **2021 IEEE international geoscience and remote sensing symposium IGARSS**. IEEE, 2021. p. 4704-4707.
- KATZSCHNER, L. Microclimatic thermal comfort analysis in cities for urban planning and open space design. **Network for Comfort and Energy Use in Buildings NCUB: London, UK**, 2006.
- KATZSCHNER, L.; MÜLDER, J. Regional climatic mapping as a tool for sustainable development. **Journal of Environmental Management**, v. 87, n. 2, p. 262–267, abr. 2008.
- KITAGAWA, Y. K. L. et al. Coastal-urban meteorology: A sensitivity study using the WRF-urban model. **Urban Climate**, v. 44, p. 101185, jul. 2022.
- KETTERER, C.; MATZARAKIS, A. Mapping the Physiologically Equivalent Temperature in urban areas using artificial neural network. **Landscape and Urban Planning**, v. 150, p. 1–9, jun. 2016.
- KONG, J. et al. Understanding the impact of heatwave on urban heat in greater Sydney: temporal surface energy budget change with land types. **Science of the Total Environment**, v. 903, p. 166374, 2023.
- KRÜGER, E. L.; MINELLA, F. O.; MATZARAKIS, A. Comparison of different methods of estimating the mean radiant temperature in outdoor thermal comfort studies. **International Journal of Biometeorology**, v. 58, n. 8, p. 1727–1737, out. 2014.
- KUMAR, P. et al. Nature-based solutions efficiency evaluation against natural hazards: Modelling methods, advantages and limitations. **Science of The Total Environment**, v. 784, p. 147058, ago. 2021.
- LAI, D. et al. A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces. **Science of The Total Environment**, v. 742, p. 140092, nov. 2020.
- LAI, P. C. et al. Spatial analytical methods for deriving a historical map of physiological equivalent temperature of Hong Kong. **Building and Environment**, v. 99, p. 22–28, abr. 2016.
- LASCHEWSKI, G.; JENDRITZKY, G. Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. **Climate Research**, v. 21, p. 91–103, 2002.
- LI, D.; BOU-ZEID, E. Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, n. 9, p. 2051–2064, set. 2013.
- LI, FEI et al. Understanding urban heat vulnerability: Scientometric analysis of five decades of research. **Urban Climate**, v. 56, p. 102035, 2024.
- LI, X. Investigating the spatial distribution of resident's outdoor heat exposure across neighborhoods of Philadelphia, Pennsylvania using urban microclimate modeling. **Sustainable Cities and Society**, v. 72, p. 103066, set. 2021.

LIBONATI, R. et al. Drought–heatwave nexus in Brazil and related impacts on health and fires: A comprehensive review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1517, n. 1, p. 44–62, nov. 2022.

LIMA, L. C. et al. Conforto térmico em espaços abertos no clima quente e úmido: estudo de caso em um parque urbano no Bioma Mata Atlântica. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 109-127, 2019.

LINDBERG, F. et al. 2019. **Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) Manual**. University of Reading UK, University of Gothenburg Sweden, SIMS China. Disponível em: <https://umep-docs.readthedocs.io/>. Acessado em: 13/05/2023

LINDBERG, F. et al. Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. **Environmental Modelling & Software**, v. 99, p. 70–87, jan. 2018.

LINDLEY, SARAH et al. Climate change, justice and vulnerability. **Joseph Rowntree Foundation, York**, p. 1-177, 2011.

LIU, W.; ZHANG, Y.; DENG, Q. The effects of urban microclimate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 190–197, set. 2016.

LOPES, A. M. S. **Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano**. 2003. 354 f. Tese (Doutorado em Geografia Física). Universidade de Lisboa, Portugal. 2003

LOUGHNAN, M.; NICHOLLS, N.; TAPPER, N. J. Mapping Heat Health Risks in Urban Areas. **International Journal of Population Research**, v. 2012, p. 1–12, 24 set. 2012.

LUCCHESI, J. R.; ANDREASI, W. A. Designing Thermally Pleasant Open Areas: The Influence of Microclimatic Conditions on Comfort and Adaptation in Midwest Brazil. **Journal of Sustainable Development**, v. 10, n. 4, p. 11, 30 jul. 2017.

MANANGAN, A. P. et al. Assessing health vulnerability to climate change. **Cent Dis Control Prev**, p. 1-23, 2015.

MANAVVI, S.; RAJASEKAR, E. Estimating outdoor mean radiant temperature in a humid subtropical climate. **Building and Environment**, v. 171, p. 106658, mar. 2020.

MANDÚ, TIAGO BENTES et al. Avaliação de tendência nas ondas de calor registradas em Manaus/AM, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 405-425, 2020.

MARENGO, J. A. et al. The heat wave of October 2020 in central South America. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 4, p. 2281–2298, 30 mar. 2022.

MARTILLI, A. et al. WRF-Comfort: simulating microscale variability in outdoor heat stress at the city scale with a mesoscale model. **Geoscientific Model Development**, v. 17, n. 12, p. 5023–5039, 27 jun. 2024.

MARTO, N. Ondas de Calor: Impactos sobre a saúde. **Acta Medica Portuguesa**, v. 18, n. 6, p. 467–474, 2005.

MARX, W.; HAUNSCHILD, R.; BORNMANN, L. Heat waves: a hot topic in climate change research. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 146, n. 1–2, p. 781–800, out. 2021.

MASON, H. et al. Systematic review of the impact of heatwaves on health service demand in Australia. **BMC Health Services Research**, v. 22, n. 1, p. 960, dez. 2022.

MASSON, V. et al. Urban Climates and Climate Change. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 45, n. 1, p. 411–444, 17 out. 2020.

MATZARAKIS, A.; MAYER, H.; IZIOMON, M. G. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. **International Journal of Biometeorology**, v. 43, n. 2, p. 76–84, 25 out. 1999.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. **International journal of biometeorology**, v. 51, p. 323–334, 2007.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. **International journal of biometeorology**, v. 54, p. 131–139, 2010.

MCEVOY, D.; AHMED, I.; MULLETT, J. The impact of the 2009 heat wave on Melbourne's critical infrastructure. **Local environment**, v. 17, n. 8, p. 783–796, 2012.

MCGREGOR, G. R. et al. (EDS.). **Heatwaves and health: guidance on warning-system development**. Geneva: World Meteorological Organization: World Health Organization, 2015.

MCMICHAEL, A. J. et al. International study of temperature, heat and urban mortality: the 'ISOTHURM' project. **International Journal of Epidemiology**, v. 37, n. 5, p. 1121–1131, out. 2008.

MCRAE, I. et al. Integration of the WUDAPT, WRF, and ENVI-met models to simulate extreme daytime temperature mitigation strategies in San Jose, California. **Building and Environment**, v. 184, p. 107180, out. 2020.

MEEHL, G. A.; TEBALDI, C. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. **Science**, v. 305, n. 5686, p. 994–997, 13 ago. 2004.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Oficina de textos, 2017.

MIDDEL, A.; LUKASCZYK, J.; MACIEJEWSKI, R. Sky View Factors from Synthetic Fisheye Photos for thermal Comfort Routing—a Case Study in Phoenix, Arizona. **Urban Planning**, Volume 2, pág. 19–30. 2017.

MOLLMANN JUNIOR, R.A. et al. Análise da sensibilidade das parametrizações no modelo WRF para o Estado do Rio Grande do Sul durante o inverno de 2014. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 368-383, 2016.

MOLNÁR, G.; GYÖNGYÖSI, A. Z.; GÁL, T. Integration of an LCZ-based classification into WRF to assess the intra-urban temperature pattern under a heatwave period in Szeged, Hungary. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, n. 1–2, p. 1139–1158, out. 2019.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano**. 1975. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975.

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

MORAES, S. L. D.; ALMENDRA, R.; BARROZO, L. V. Impact of heat waves and cold spells on cause-specific mortality in the city of São Paulo, Brazil. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 239, p. 113861, jan. 2022.

MORAES, S. L. De. **O impacto das ondas de frio e de calor na mortalidade em São Paulo: uma análise espaço-temporal do excesso de mortalidade de pessoas com 65 anos ou mais de idade**. 2023. 171 f. Tese (Doutorado em Geografia Física). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo.

MORIWAKI, R.; KANDA, M. Seasonal and Diurnal Fluxes of Radiation, Heat, Water Vapor, and Carbon Dioxide over a Suburban Area. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, n. 11, p. 1700–1710, 1 nov. 2004.

MOURA, M. O. **Anomalias das temperaturas extremas do ar em Fortaleza: correlações com a morbidade hospitalar por doenças cardiovasculares**. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

NAIRN, J. R.; FAWCETT, R. **Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia**. Melbourne: Centre for Australian Weather and Climate Research, 2013.

NCEP, National Centers for Environmental Prediction / National Weather Service / NOAA / U.S. Department of Commerce. 2000, updated daily. **NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999**. Arquivo de dados de pesquisa do National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. Disponível em : <<https://doi.org/10.5065/D6M043C6>>. Acessado em 05/01/2023.

NIKFAL, A. PostWRF: Interactive tools for the visualization of the WRF and ERA5 model outputs. **Environmental Modelling & Software**, v. 160, p. 105591, fev. 2023.

O’SULLIVAN, D.; UNWIN, D. **Geographic information analysis**. Segunda edição. Editora John Wiley & Sons. New Jersey, Canada.2010

OBE, O. B.; MORAKINYO, T. E.; MILLS, G. An assessment of WRF-urban schemes in simulating local meteorology for heat stress analysis in a tropical sub-Saharan African city, Lagos, Nigeria. **International Journal of Biometeorology**, v. 68, n. 5, p. 811–828, maio 2024.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1–24, jan. 1982.

OKE, T. R. et al. The energy balance of central Mexico City during the dry season. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 24–25, p. 3919–3930, out. 1999.

OKE, T. R. et al. **Urban climates**. Ed. Cambridge university press, 2017.

OLGYAY, V. **Arquitectura e Clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

OLIVEIRA, J. L. A De. **Uma contribuição aos estudos sobre a relação transporte e crescimento urbano: o caso de João Pessoa**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

PAIXÃO, E. J.; NOGUEIRA, P. J. Efeitos de uma onda de calor na mortalidade. **Revista Portuguesa de Saúde Pública**, v. 21, n. 1, p. 41-54, 2003.

PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION (PAHO), 2021. **Heatwaves: A Guide for Health-based Actions**. Washington, D.C.: Pan American Health Organization; 2021. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://doi.org/10.37774/9789275124086>.

PANTAVOU, K. et al. Evaluation of thermal discomfort in Athens territory and its effect on the daily number of recorded patients at hospitals' emergency rooms. **International Journal of Biometeorology**, v. 52, n. 8, p. 773–778, nov. 2008.

PARAÍBA, Constituição Estadual. **Capítulo IV–Da proteção do meio ambiente e do solo, Art. 229**. Promulgada em, 1989.

PATEL, P. et al. Modeling Large-Scale Heatwave by Incorporating Enhanced Urban Representation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 127, n. 2, p. e2021JD035316, 27 jan. 2022.

PBMC. **Mudanças Climáticas e Cidades: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. 1. ed. Rio de Janeiro: COPPE – UFRJ, 2016. v. 1

PEDRUZZI, RIZZIERI et al. Update of land use/land cover and soil texture for Brazil: Impact on WRF modeling results over São Paulo. **Atmospheric Environment**, v. 268, p. 118760, 2022.

PEREGRINO, P. S. A. **Interrelações existentes entre os escoamentos de ventos e os padrões de ocupação do solo nos bairros do Cabo Branco e Tambaú/João pessoa-PB**. Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em arquitetura e urbanismo, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

PEREZ, L. P.; SALES, A. L. P.; SILVEIRA, J. A. R. D. Climate change and the unsustainable urbanism in the municipality of João Pessoa, PB, Brazil. **Sustentabilidade em Debate**, v. 11, n. 2, p. 304–340, 2 set. 2020.

PERKINS, S. E. A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. **Atmospheric Research**, v. 164–165, p. 242–267, out. 2015.

PERKINS, S. E.; ALEXANDER, L. V. On the Measurement of Heat Waves. **Journal of Climate**, v. 26, n. 13, p. 4500–4517, 1 jul. 2013.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E. et al. Natural hazards in Australia: heatwaves. **Climatic Change**, v. 139, n. 1, p. 101–114, nov. 2016.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; LEWIS, S. C. Increasing trends in regional heatwaves. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 3357, 3 jul. 2020.

POTCHTER, O. et al. Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. **Science of The Total Environment**, v. 631–632, p. 390–406, ago. 2018.

POWERS, J. G. et al. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 8, p. 1717–1737, 1 ago. 2017.

PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. 2005. Tese (Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PYRGOU, A.; HADJINICOLAOU, P.; SANTAMOURIS, M. Urban-rural moisture contrast: Regulator of the urban heat island and heatwaves' synergy over a mediterranean city. **Environmental Research**, v. 182, p. 109102, mar. 2020.

QGIS Development Team, 2017. QGIS Geographic Information System. **Open-Source Geospatial Foundation Project**. <http://qgis.osgeo.org>

RAGHAVENDRA, A. et al. Floridian heatwaves and extreme precipitation: future climate projections. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 1–2, p. 495–508, jan. 2019.

RAMAMURTHY, P.; BOU-ZEID, E. Heatwaves and urban heat islands: A comparative analysis of multiple cities. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 1, p. 168–178, 16 jan. 2017.

REGOTO, P. et al. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5125–5142, set. 2021.

REID, C. E. et al. Mapping Community Determinants of Heat Vulnerability. **Environmental Health Perspectives**, v. 117, n. 11, p. 1730–1736, nov. 2009.

REIS, N. C. S.; BOIASKI, N. T.; FERRAZ, S. E. T. Characterization and Spatial Coverage of Heat Waves in Subtropical Brazil. **Atmosphere**, v. 10, n. 5, p. 284, 21 maio 2019.

RIBEIRO, I. et al. Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ. **Atmospheric Research**, v. 248, p. 105220, jan. 2021.

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

RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. S.. Mudanças climáticas e cidades: relatório especial do painel brasileiro de mudanças climáticas. **Rio de Janeiro: PBMC**, 2016.

ROBINSON, P. J. On the Definition of a Heat Wave. **Journal of Applied Meteorology**, v. 40, n. 4, p. 762–775, abr. 2001.

ROCHA, A. et al. A Consistent Methodology to Evaluate Temperature and Heat Wave Future Projections for Cities: A Case Study for Lisbon. **Applied Sciences**, v. 10, n. 3, p. 1149, 8 fev. 2020.

ROMERO, M. A. B. . **Arquitetura Bioclimática do Espaço Público**. Brasília: Editora UnB, 2001. v. 1. 225 p .

ROSHAN, G.; MOGHBEL, M.; ATTIA, S. Evaluating the wind cooling potential on outdoor thermal comfort in selected Iranian climate types. **Journal of Thermal Biology**, v. 92, p. 102660, ago. 2020.

ROTH, M.; JANSSON, C.; VELASCO, E. Multi-year energy balance and carbon dioxide fluxes over a residential neighbourhood in a tropical city. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2679–2698, abr. 2017.

ROYÉ, D. et al. Heat wave intensity and daily mortality in four of the largest cities of Spain. **Environmental Research**, v. 182, p. 109027, mar. 2020.

RUSSO, S. et al. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 22, 27 nov. 2014.

SALAMANCA, FRANCISCO et al. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. **Theoretical and applied climatology**, v. 99, p. 331-344, 2010.

SALVADOR, NADIR et al. Study of the thermal internal boundary layer in sea breeze conditions using different parameterizations: application of the WRF model in the greater Vitória region. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4 suppl 1, p. 593-609, 2016.

SANTAMOURIS, M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact.

Synergies with the global climate change. **Energy and Buildings**, v. 207, p. 109482, jan. 2020.

SANTAMOURIS, M.; PAPAKONSTANTINO, K.; GEORGAKIS, C. Natural ventilation in urban areas. **AIVC VIP**, v. 3, 2004.

SANTOS, I. G.; LIMA, H. G.; ASSIS, E. S. Influência da geometria urbana e da inércia térmica na alteração do clima urbano: uma abordagem preditiva. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, 7o, p. 706-713, 2003.

SANTOS, J. H. **Determinação e verificação de ângulos de céu decorrentes dos padrões de ocupação do solo nos bairros de Cabo Branco e Tambaú / João Pessoa**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba.

SANTOS, J. S. **Campo térmico urbano e a sua relação com o uso e cobertura do solo em uma cidade tropical úmida**. 112 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Programa De Pós-Graduação Em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SCHLEGEL, R. W.; SMIT, A. J. heatwaveR: A central algorithm for the detection of heatwaves and cold-spells. **Journal of Open Source Software**, v. 3, n. 27, p. 821, 2018.

SILVA JÚNIOR, J. A. et al. Análise de acurácia altimétrica para dados ALOS PALSAR e ASTER GDEM para o município do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 10, n. 2, p. 117, 4 jul. 2022.

SILVA, A. F.; FISCH, G. Avaliação do Modelo WRF para a Previsão do Perfil do Vento no Centro de Lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 259-270, 2014.

SILVA, F. A. G. **O vento como ferramenta no desenho do ambiente construído: uma aplicação ao nordeste do Brasil**. 1999. 234 p. Tese (Doutorado em Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

SILVA, F. T.; ALVAREZ, C. E. An integrated approach for ventilation's assessment on outdoor thermal comfort. **Building and Environment**, v. 87, p. 59-71, 2015.

SILVA, N. D. S. et al. Ocorrência de Ondas de Calor com Dados de Reanálises em áreas do Nordeste, Amazônia e Centro-Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 4, p. 441–451, out. 2022.

SILVA, R. S. et al. Thermal comfort conditions at microclimate scale and surface urban heat island in a tropical city: A study on João Pessoa city, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 66, n. 6, p. 1079–1093, jun. 2022.

SILVEIRA, R. D.; NETO, J. L. S. As repercussões dos eventos climáticos extremos nas regiões socioeconômicas do Rio Grande do Sul. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 42, n. 1, 2015.

SIMÕES, G. M. F.; LEDER, S. M.; LABAKI, L. C. How uncomfortable and unhealthy can social (low-cost) housing in Brazil become with use? **Building and Environment**, v. 205, p. 108218, nov. 2021.

SIRKO, W. et al. Continental-scale building detection from high resolution satellite imagery. **arXiv:2107.12283**, 2021. Disponível em: <https://sites.research.google/gr/open-buildings/>. Acessado em: 04/04/2022.

SKAMAROCK, W. C. et al. A description of the advanced research WRF version 4. **NCAR tech. note ncar/tn-556+ str**, v. 145, 2019.

SNUC - SISTEMA NACIONAL DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO. **Painel Unidade de Conservação Brasileira**. 2010. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/areas-protetidas/sistema-nacional-de-unidades-de-conservacao-da-natureza-snuc>. Acesso em 02/02/2021.

SOUZA, et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 10.3390/rs12172735, 2020.

SOUZA, J. F. D.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa - PB. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 21–37, jan. 2016.

SOUZA, N. B. P. et al. Wind mapping using the mesoscale WRF model in a tropical region of Brazil. **Energy**, v. 240, p. 122491, 2022.

SOUZA, V. S.; KATZSCHNER, L. Mapa climático urbano da cidade de João Pessoa/PB. In: **8º Congresso luso-brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável (PLURIS 2018)**, 2018, Coimbra. 2018. v. 01. p. 1622-1634.

SOUZA, V. S. et al. Calibração de Mapa Climático Urbano da Cidade de João Pessoa/PB apoiada por simulação computacional. **XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias (XV ENCAC e XI ELACAC)**. 2019. João Pessoa. p. 1106-1115.

SOUZA, V. S. **Mapa climático urbano da cidade de João Pessoa/PB**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) Programa de Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2010

STAIGER, H.; MATZARAKIS, A. Uncertainty in mean radiant temperature and in thermal indices due to modelled radiant components. **Tharandter Klimaprotokolle**, v. 20, p. 8, 2014.

STEFANON, M.; D'ANDREA, F.; DROBINSKI, P. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 1, p. 014023, 1 mar. 2012.

STEWART, I. D.; MILLS, G. **The Urban Heat Island**. San Diego: Elsevier, 2021.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 1 dez. 2012.

TASSONE, SPENCER J. et al. Increasing heatwave frequency in streams and rivers of the United States. **Limnology and Oceanography Letters**, v. 8, n. 2, p. 295-304, 2023.

TAVARES, L. F. A. et al. Influence of the WRF model and atmospheric reanalysis on the offshore wind resource potential and cost estimation: A case study for Rio de Janeiro State. **Energy**, v. 240, p. 122767, fev. 2022.

TEULING, A. J. et al. Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. **Nature Geoscience**, v. 3, n. 10, p. 722–727, out. 2010.

TEWARI, M.; et al. Implementation and verification of the united NOAA land surface model in the WRF model. **20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction**, 11-15, 2016.

THOMPSON, G. et al. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 12, p. 5095–5115, 1 dez. 2008.

THORSSON, S. et al. Mean radiant temperature – A predictor of heat related mortality. **Urban Climate**, v. 10, p. 332–345, dez. 2014.

THORTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology; 1955, 104 p.

TOMLINSON, C. J. et al. Derivation of Birmingham’s summer surface urban heat island from MODIS satellite images. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 2, p. 214–224, fev. 2012.

TONG, S. et al. The impact of heatwaves on mortality in Australia: a multicity study. **BMJ Open**, v. 4, n. 2, p. e003579, fev. 2014.

TSITOURA, M.; TSOUTSOS, T.; DARAS, T. Evaluation of comfort conditions in urban open spaces. Application in the island of Crete. **Energy Conversion and Management**, v. 86, p. 250–258, out. 2014.

TSOKA, S.; TSIKALOUDAKI, A.; THEODOSIOU, T. Analyzing the ENVI-met microclimate model’s performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. **Sustainable cities and society**, v. 43, p. 55-76, 2018.

VDI, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. 2015. **VDI-Guideline 3787, Part 1: Environmental Meteorology - Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions**. Berlin: VDI, Beuth Verlag.

VENABLES, W. N.; SMITH, D. M.; TEAM, R. D. C. **An Introduction to R - Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics**. Viena. The R Development Core Team, 21 abr. 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/R-intro.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2023

VENTURA, THIAGO MEIRELLES et al. Análise da aplicabilidade de métodos estatísticos para preenchimento de falhas em dados meteorológicos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 2016.

VILLAR FILHO, O. D. C.; ARAÚJO, V. M. D. D.; COSTA, A. D. L. Estudos microclimáticos de revestimentos das estruturas viárias em uma fração urbana de João Pessoa/PB. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 11, p. 35–44, 31 dez. 1969.

WANG, D. et al. The impact of extremely hot weather events on all-cause mortality in a highly urbanized and densely populated subtropical city: A 10-year time-series study (2006–2015). **Science of The Total Environment**, v. 690, p. 923–931, nov. 2019.

WANG, X. Y. et al. The impact of heatwaves on mortality and emergency hospital admissions from non-external causes in Brisbane, Australia. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 69, n. 3, p. 163–169, mar. 2012.

WEEDING, B. et al. Urban Design for Climate Change - an Outdoor Thermal Stress Perspective. **SSRN**, 2024. Disponível em: <https://www.ssrn.com/abstract=4806769>. Acesso em: 20 out. 2024

WEI, Y.; CHEN, H.; HUANG, J. J. Response of surface energy components to urban heatwaves and its impact on human comfort in coastal city. **Urban Climate**, v. 54, p. 101836, mar. 2024.

WMO. **WMO Guidelines on the Definition and Characterization of Extreme Weather and Climate Events**. WMO-No: 1310, Geneva 2, Switzerland, 2023.

XIE, Y. et al. Evaluation of a multi-nodal thermal regulation model for assessment of outdoor thermal comfort: Sensitivity to wind speed and solar radiation. **Building and Environment**, v. 132, p. 45–56, mar. 2018.

XU, Z. et al. Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: A systematic review and meta-analysis. **Environment International**, v. 89–90, p. 193–203, abr. 2016.

YADAV, N. et al. Systematic exploration of heat wave impact on mortality and urban heat island: A review from 2000 to 2022. **Urban Climate**, v. 51, p. 101622, set. 2023.

YANG, Y.; JIN, C.; ALI, S. Projection of heat wave in China under global warming targets of 1.5 °C and 2 °C by the ISIMIP models. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105057, nov. 2020.

YANG, S. et al. Comparing impact of multi-factor planning layouts in residential areas on summer thermal comfort based on orthogonal design of experiments (ODOE). **Building and Environment**, v. 182, p. 107145, set. 2020.

YOU, Q. et al. A comparison of heat wave climatologies and trends in China based on multiple definitions. **Climate Dynamics**, v. 48, n. 11–12, p. 3975–3989, jun. 2017.

YU, E. et al. Impact of physical parameterizations on wind simulation with WRF V3.9.1.1 under stable conditions at planetary boundary layer gray-zone resolution: a

case study over the coastal regions of North China. **Geoscientific Model Development**, v. 15, n. 21, p. 8111–8134, 11 nov. 2022.

YUAN, CHAO. **Urban wind environment: Integrated climate-sensitive planning and design**. Springer, 2018.

ZONATO, A. et al. Evaluating the performance of a novel WUDAPT averaging technique to define urban morphology with mesoscale models. **Urban Climate**, v. 31, p. 100584, mar. 2020.

## APÊNDICE

### APÊNDICE 1 – Métricas aplicadas na caracterização das ondas de calor

O **número de episódios** (ou frequência absoluta) é o resultado do número anual de episódios de Ondas de Calor identificados. O número de episódios foi obtido pela Equação 3:

$$N = \sum_{i=1}^{n=365} OC , \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: **N** é o número anual de Ondas de Calor identificada na estação meteorológica com base na definição proposta. Considerou-se OC como uma variável binária que indica o período identificado como Onda de Calor, ou seja, OC= 1 é um episódio com pelo menos três dias de duração e OC=0 não é um episódio.

A **duração dos episódios** é o somatório de dias de Ondas de Calor por evento, ou seja, cada data dentro do período de um evento extremo é considerada um dia de Onda de Calor (OCd). O cálculo da duração dos episódios é apresentado na Equação 4:

$$D = \sum_{i=1}^{n=OC} OCd , \quad (\text{Eq. 4})$$

onde: **D** é o número de dias de uma Onda de Calor em uma estação meteorológica com base na definição proposta. **OCd** é considerada uma variável binária, portanto OCd = 1 é um dia com Onda de Calor e OCd =0 é um dia sem Onda de Calor.

A **frequência de Ondas de Calor** é o número total de episódios de Ondas de Calor mensal do período de estudo por estação meteorológica. O cálculo da frequência mensal é expresso pela Equação 5:

$$F = \sum_{i=1}^{n=mês} OC , \quad (\text{Eq. 5})$$

onde: **F** é a frequência mensal de Ondas de Calor por estação meteorológica. Considerou-se OC como uma variável binária que indica o período identificado como Onda de Calor, ou seja, OC = 1 é um episódio com pelo menos três dias de duração e OC = 0 não é um episódio.

A **intensidade média de uma Onda de Calor** é a média aritmética da intensidade diária de um episódio de Onda de Calor. A intensidade de uma OC em um determinado dia é obtida pela subtração do valor de Tmax (°C) pelo valor da média climatológica do referido dia. A forma de cálculo da intensidade média é mostrada na Equação 6:

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^{n=OC} T_{max}(t) - T_m(j)}{D}, \quad (\text{Eq. 6})$$

onde  $\bar{I}$  é a intensidade média de um episódio de OC por estação meteorológica, **Tmax(t)** é o valor de Tmax (°C) do dia de OC, **Tm(j)** é o valor da média climatológica calculada para o período de referência para o dia de OC e **D** é o número de dias do episódio. Adicionalmente, a média das intensidades médias de todos os episódios de Ondas de Calor por estação meteorológica foi calculado, conforme a Equação 7:

$$\bar{I}_m = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{I}}{N}, \quad (\text{Eq. 7})$$

onde:  $\bar{I}_m$  é média de  $\bar{I}$  e **N** é o número de Ondas de Calor por estação meteorológica.

As **taxas de ascensão e de declínio** são duas métricas que avaliam o crescimento e decrescimento de uma OC com base nos valores de Tmax (°C). Estas taxas têm como unidade de medida o grau/dia. Portanto, a taxa de ascensão é calculada com base nos valores de Tmax (°C) referentes ao início do evento até o seu pico e a taxa de declínio é calculada com base nos valores de Tmax (°C) referentes no pico do evento até o seu final. A taxa de ascensão é computada pela Equação 8:

$$T_{as} = \frac{i_{max} - (T(ts-1) - T_m(j-1))}{t_{max} - (ts-1)}, \quad (\text{Eq. 8})$$

onde: **Tas** é a taxa de ascensão, **imax** é a intensidade máxima da OC, **T(ts -1)** é valor da temperatura do ar registrada no dia anterior ao evento, **Tm(j-1)** é o valor da média climatológica calculada para o período de referência do dia anterior ao evento, **tmax** é o dia do ano da OC com o maior valor de Tmax (°C) e **(ts-1)** é o dia do ano anterior ao início da OC. A taxa de declínio é dada pela Equação 9:

$$T_d = \frac{imax - (T(te+1) - Tm(j+1))}{te - tmax} \quad (\text{Eq. 9})$$

onde: **Td** é a taxa de declínio, **imax** é a intensidade máxima da OC, **T(te+1)** é valor da temperatura do ar registrada no dia posterior ao evento, **Tm(j+1)** é o valor da média climatológica calculada para o período de referência do dia posterior ao evento, **te** é o dia do ano que representa o término do evento e **tmax** é o dia do ano da OC com o maior valor de Tmax (°C).

## APÊNDICE 2 – Dados dos atributos climáticos dos eventos selecionados por estação meteorológica

Quadro 12 - Dados dos atributos climáticos dos eventos EV01, EV02, EV03 e EV04.

07/01/2019	Estação 82798				Estação 82800					Estação A320					
	Tmax	Precipit.	Vento	UR	Tmax	Precipit.	Vento	Vento	UR	Tmax	Precipit.	Vento	Vento	Radiação	UR
	(°C)	(mm)	(m/s)	(%)	(°C)	(mm)	(m/s)	(°)	(%)	(°C)	(mm)	(m/s)	(°)	Kj/m2	(%)
04/jan	33,30	0,00	2,33	69,00	32,00	0,00	12,00	100,00	53,00	32,10	0,00	3,20	134°	3155,24	61,00
05/jan	32,40	0,00	2,53	72,50	30,50	0,00	14,00	100,00	64,00	31,40	0,00	2,80	115,00	1958,12	68,00
06/jan	32,60	0,00	2,30	69,50	31,50	0,00	13,00	100,00	57,00	31,90	0,00	2,90	123,00	2573,31	63,00
07/jan	32,80	0,00	1,97	70,25	30,80	0,00	13,00	80,00	57,00	32,10	0,00	3,00	113,00	3279,10	61,00
08/jan	32,80	0,00	2,77	70,25	30,90	0,00	13,00	80,00	60,00	32,40	0,00	2,70	98,00	3442,55	55,00
09/jan	<b>33,00</b>	0,00	2,97	<b>67,75</b>	<b>32,20</b>	2,00	16,00	110,00	50,00	32,40	0,00	2,90	117,00	2341,09	62,00
<b>10/jan</b>	<b>32,80</b>	0,00	2,60	68,00	31,80	1,00	13,00	110,00	<b>49,00</b>	<b>32,60</b>	0,00	2,90	131,00	3602,20	<b>53,00</b>
11/jan	32,40	7,00	3,40	69,00	<b>32,30</b>	0,20	13,00	140,00	49,00	30,80	0,00	4,30	146,00	3702,43	58,00
12/jan	28,00	0,00	1,93	85,50	28,10	0,00	13,00	140,00	78,00	26,30	<b>0,00</b>	1,20	186,00	772,30	84,00
11/04/2020	Estação 82798				Estação 82800					Estação A320					
	Tmax	Precipit.	Vento	UR	Tmax	Precipit.	Vento	Vento	UR	Tmax	Precipit.	Vento	Vento	Radiação	UR
	(°C)	(mm)	(m/s)	(%)	(°C)	(mm)	(m/s)	(°)	(%)	(°C)	(mm)	(m/s)	(°)	Kj/m	(%)
08/abr	33,00	0,00	1,00	72,00	31,50	NULL	5,70	110,00	61,00	32,30	0,00	1,30	150,00	3313,03	57,00
09/abr	33,00	0,00	1,40	76,50	31,50	NULL	4,10	140,00	67,00	32,80	0,00	1,20	141,00	3238,00	59,00
10/abr	33,00	0,20	0,57	78,75	31,60	NULL	4,60	90,00	69,00	31,70	0,00	1,50	80,00	2786,48	63,00
11/abr	<b>33,90</b>	1,20	1,33	71,25	NULL	NULL	5,10	90,00	69,00	32,60	0,00	1,60	97,00	3360,92	58,00
12/abr	33,00	0,00	2,17	68,50	<b>32,00</b>	NULL	5,10	90,00	<b>59,00</b>	32,80	0,00	1,30	132,00	3305,46	59,00
13/abr	33,00	0,00	1,65	72,00	31,90	NULL	4,60	110,00	62,00	32,60	0,00	1,70	134,00	2986,82	58,00
<b>14/abr</b>	<b>33,50</b>	0,10	1,43	72,25	<b>32,00</b>	NULL	5,70	140,00	64,00	<b>33,00</b>	0,00	1,40	158,00	3122,47	<b>58,00</b>
15/abr	<b>30,40</b>	7,80	0,60	88,50	29,00	NULL	2,60	70,00	83,00	29,80	<b>0,00</b>	1,20	60,00	2204,47	71,00
16/abr	30,80	10,00	0,00	<b>95,00</b>	NULL	NULL	2,10	350,00	<b>91,00</b>	30,60	<b>0,00</b>	1,60	79,00	2668,36	75,00

30/11/2021	Estação 82798				Estação 82800					Estação A320					
	Tmax	Precipit.	Vento	UR	Tmax	Precipit.	Vento	Vento	UR	Tmax	Precipit.	Vento	Vento	Radiação	UR
	(°C)	(mm)	(m/s)	(%)	(°C)	(mm)	(m/s)	(°)	(%)	(°C)	(mm)	(m/s)	(°)	Kj/m	(%)
28/nov	32,60	0,40	2,31	77,00	31,1	0,00	5,10	80,00	66,00	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
29/nov	32,60	0,00	0,26	73,00	31,2	0,00	5,10	70,00	63,00	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
30/nov	33,00	1,00	0,51	73,00	31,9	0,00	5,70	60,00	64,00	32,20	0,00	1,70	57,00	3379,48	58,00
01/dez	32,80	0,00	0,77	72,00	31,3	0,00	5,10	70,00	<b>59,00</b>	32,70	0,00	1,80	107,00	2914,30	58,00
02/dez	32,80	0,00	1,03	72,00	31,4	0,00	5,10	80,00	63,00	31,70	0,00	1,60	79,00	3250,89	61,00
03/dez	33,30	0,00	1,03	72,00	<b>31,8</b>	0,00	4,60	70,00	63,00	32,50	0,00	1,70	108,00	2578,32	55,00
04/dez	33,30	0,40	1,80	78,00	31,4	0,00	5,70	100,00	73,00	32,40	0,00	1,80	118,00	3186,54	57,00
<b>05/dez</b>	33,30	0,00	2,31	69,00	31,6	0,00	6,20	100,00	67,00	<b>33,40</b>	0,00	1,40	110,00	3144,81	55,00
06/dez	<b>33,50</b>	0,00	1,80	<b>69,00</b>	31,2	0,00	6,70	90,00	61,00	33,20	0,00	2,10	117,00	3297,07	54,00
07/dez	33,30	1,00	1,20	69,50		0,00	5,10	90,00	59,00	32,40	0,00	1,50	101,00	3157,03	<b>52,00</b>
08/dez	<b>32,20</b>	10,20	1,89	<b>77,75</b>	30,6	0,00	5,70	70,00	65,00	31,10	<b>0,00</b>	1,90	78,00	2919,98	60,00
11/03/2023	Estação 82798				Estação 82800					Estação A320					
	Tmax	Precipit.	Vento	UR	Tmax	Precipit.	Vento	Vento	UR	Tmax	Precipit.	Vento	Vento	Radiação	UR
	(°C)	(mm)	(m/s)	(%)	(°C)	(mm)	(m/s)	(°)	(%)	(°C)	(mm)	(m/s)	(°)	Kj/m	(%)
08/mar	32,80	2,20	null	81,00	31,00	2,00	7,20	100,00	70,00	32,10	<b>0,00</b>	1,60	125,00	3346,43	62,00
09/mar	32,40	1,20	null	70,50	31,00	0,50	7,7	110	62	32,30	<b>0,00</b>	1,60	122,00	2665,03	56,00
10/mar	33,30	0,00	null	70,50	30,90	0,00	6,7	110	62	32,70	0,00	1,30	145,00	3108,95	56,00
11/mar	<b>33,90</b>	0,00	null	<b>69,00</b>	30,90	0,00	6,7	110	60	32,90	0,00	1,90	94,00	3204,23	<b>51,00</b>
12/mar	33,50	0,00	null	71,25	31,60	0,00	-	-	-	32,90	0,00	1,40	124,00	3044,73	53,00
13/mar	33,30	0,00	null	76,25	<b>31,80</b>	0,00	6,2	100	65	<b>33,20</b>	0,20	1,40	126,00	3223,13	53,00
<b>14/mar</b>	33,50	0,00	null	73,25	30,70	0,90	6,2	100	57	<b>33,40</b>	0,00	1,30	117,00	3104,16	53,00
15/mar	32,00	0,00	null	78,50	30,40	0,00	3,1	160	65	32,10	<b>0,00</b>	0,90	127,00	1758,47	64,00
16/mar	<b>31,20</b>	0,00	null	<b>84,25</b>	<b>30,30</b>	2	2,6	170	69	29,10	0,60	1,10	109,00	2074,13	76,00

### APÊNDICE 3 – Índices estatísticos utilizados na validação dos dados de saída do modelo WRF

Os índices viés médio (*mean bias* – MB), erro médio absoluto (*mean absolute gross error* – MAGE) e raiz do erro quadrático médio (*root mean square error* - RMSE) referem-se a erros e desvios do modelo. Desse modo, a alta qualidade das simulações deve ter valores mais próximos a zero (KITAGAWA et al., 2022). O índice de concordância (*index of agreement* - IOA) é um índice de associação de concordância entre dados observados e simulados, no qual zero indica ausência de correlação e valores mais próximos a 1 indicam forte correlação. A definição dos indicadores estatísticos recomendados por tais autores, assim como as suas respectivas equações, são apresentadas a seguir.

- **Viés Médio** (*mean bias* – MB): avalia a tendência de o modelo superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) o dado simulado em relação ao observado.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \quad (\text{Eq. 10})$$

onde: MB é o viés médio,  $M_i$  é o dado simulado,  $O_i$  é o dado observado e  $n$  é o número de observações consideradas.

- **Erro médio absoluto** (*mean absolute gross error* – MAGE): também avalia a tendência de o modelo superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) o dado simulado em relação ao observado, contudo anula a compensação de erros positivos e negativos.

$$MAGE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \quad (\text{Eq.11})$$

onde: MAGE é o erro médio absoluto,  $M_i$  é o dado simulado,  $O_i$  é o dado observado e  $n$  é o número de observações consideradas.

- **Raiz do erro quadrático médio** (*root mean square error* - RMSE): expressa o erro total do modelo nas mesmas dimensões da variável analisada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad (\text{Eq. 12})$$

onde: RMSE é a raiz do erro quadrático médio,  $M_i$  é o dado simulado,  $O_i$  é o dado observado e  $n$  é o número de observações consideradas.

- **Índice de concordância** (*index of agreement* - IOA): avalia a proximidade do valor simulado do observado. Este índice varia de 0 a 1 e quanto maior o valor do índice melhor é a concordância das informações observadas e simuladas.

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (\text{Eq. 13})$$

onde: IOA é o índice de concordância,  $M_i$  é o dado simulado,  $O_i$  é o dado observado,  $\bar{O}$  é a média aritmética dos dados observados e  $n$  é o número de observações consideradas.

#### APÊNDICE 4 – Mapas dos parâmetros urbanos da cidade de João Pessoa

Figura 42 - Mapa hipsométrico da cidade de João Pessoa baseado no modelo digital de superfície do produto ALOS PALSAR (rtc)

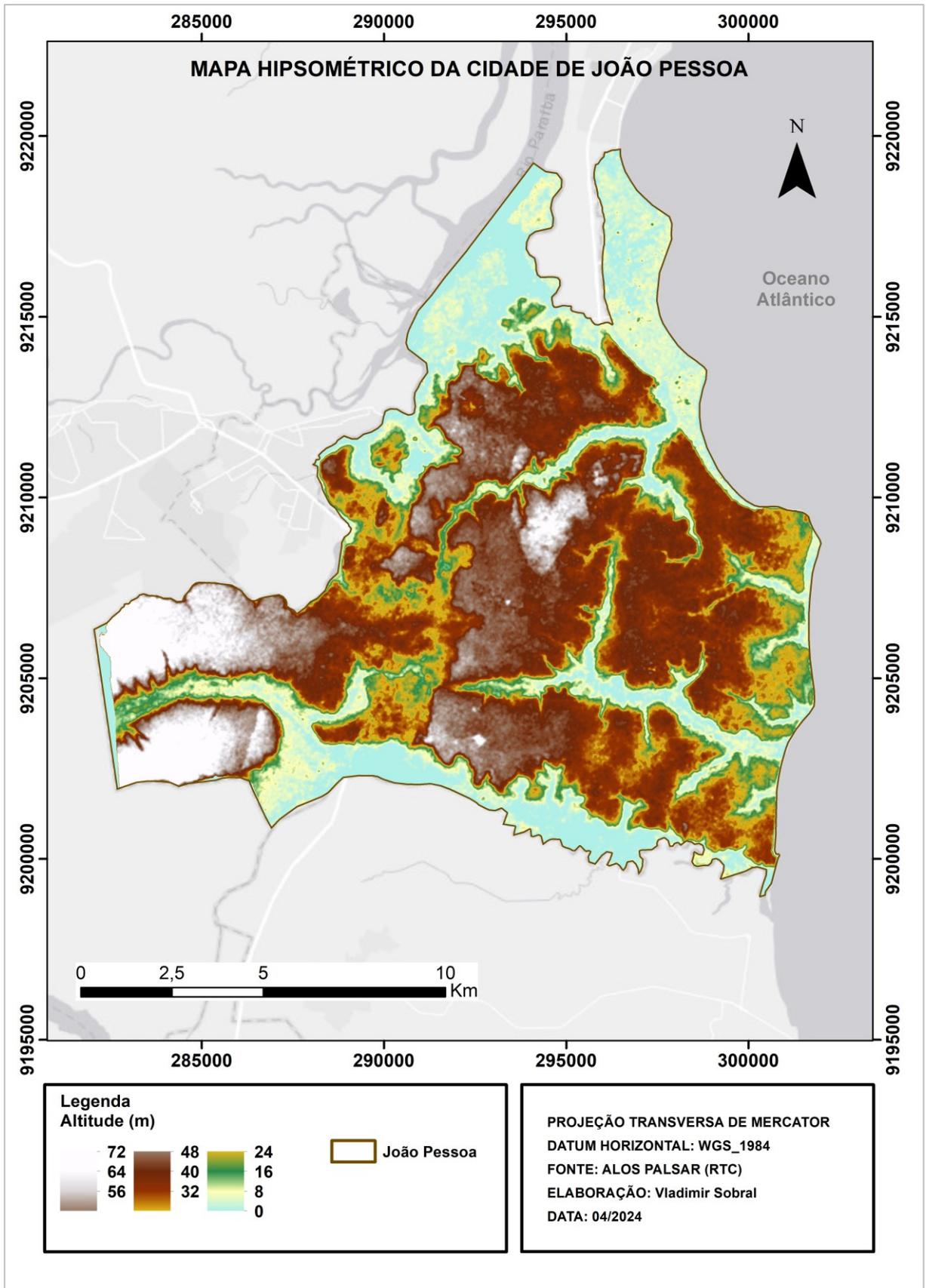


Figura 43 - Mapa de edifícios da cidade de João Pessoa

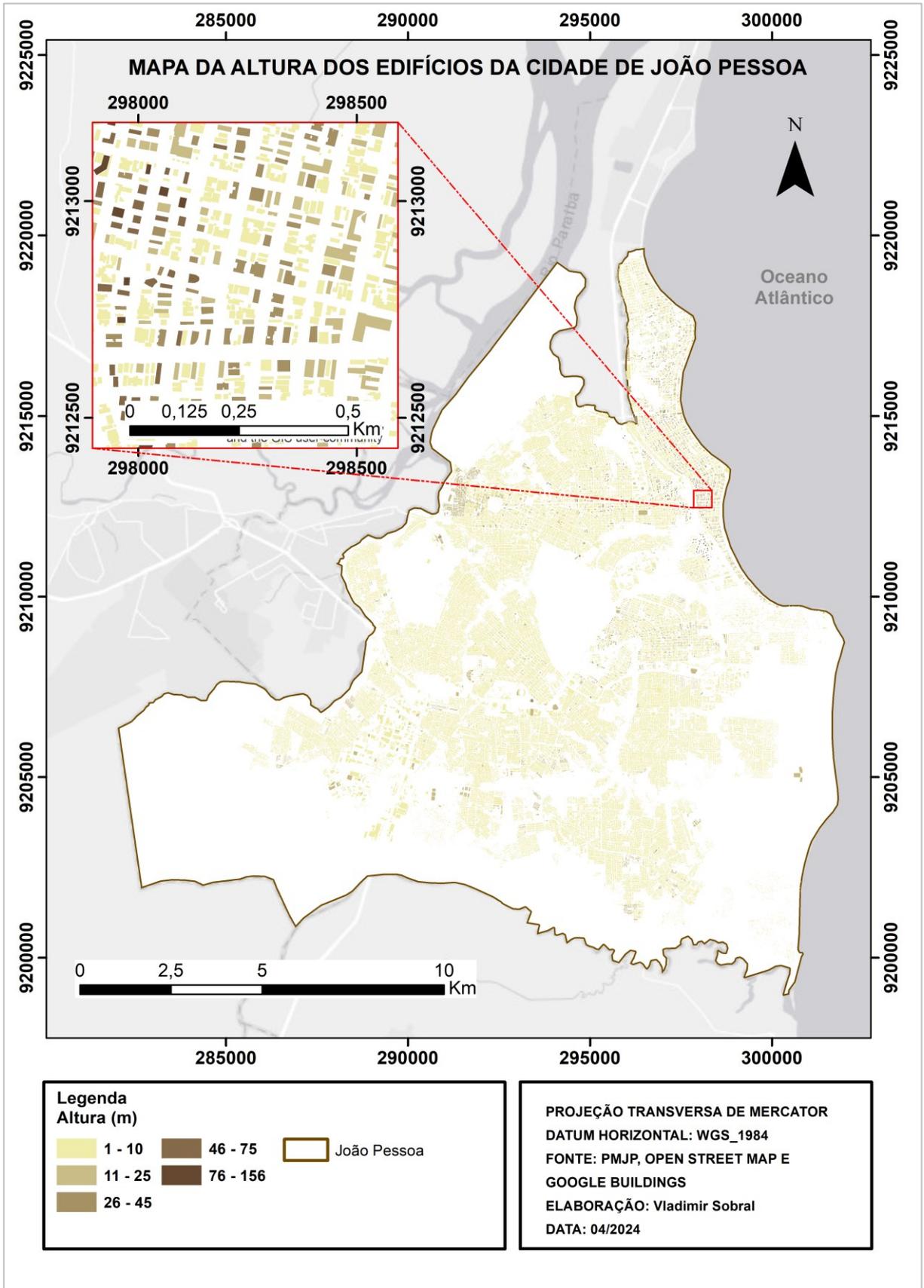


Figura 44 - Mapa de árvores urbanas da cidade de João Pessoa

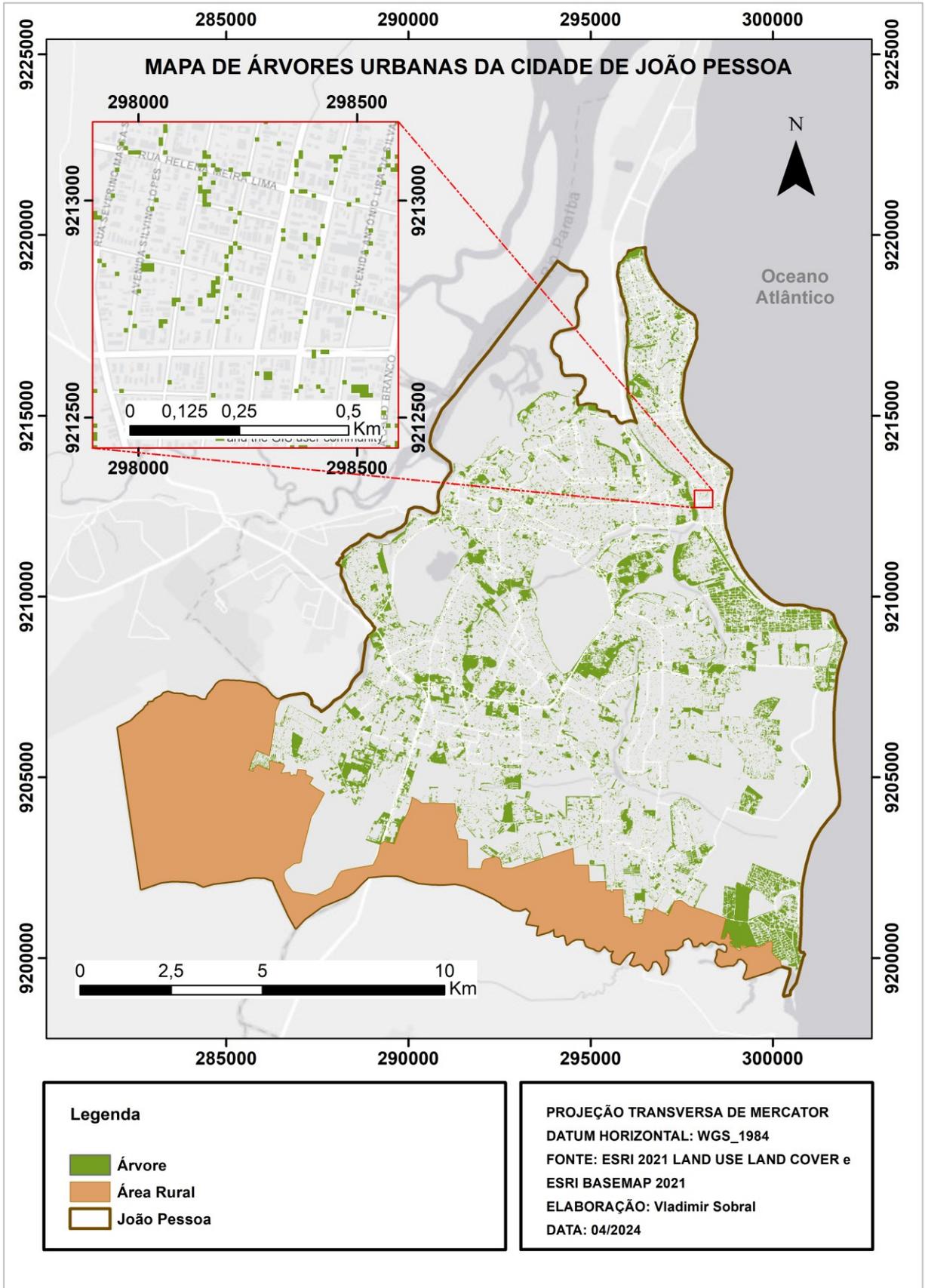
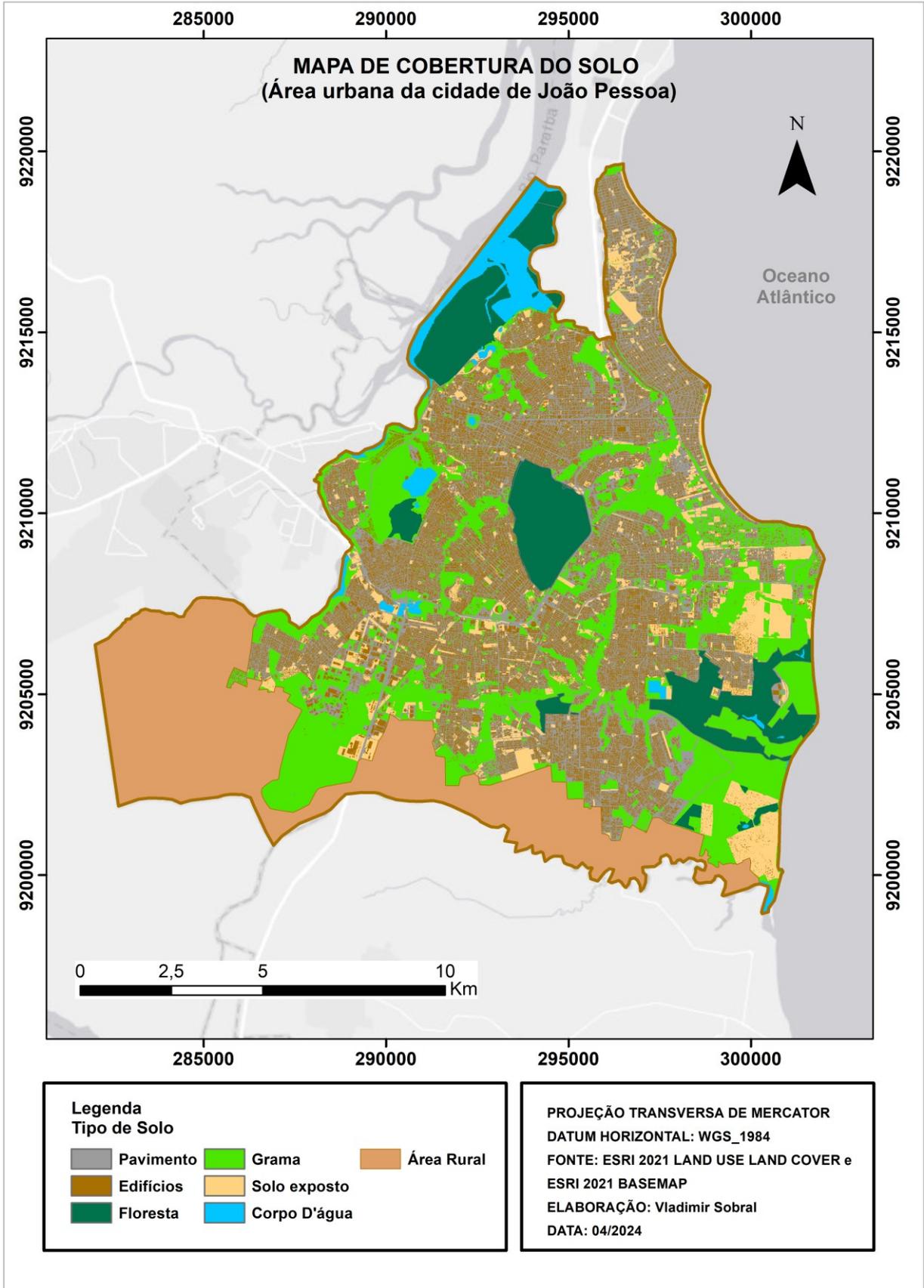


Figura 45 - Mapa de tipo de cobertura do solo da área urbana da cidade de João Pessoa.



## APÊNDICE 5 – Estatísticas das Ondas de Calor da série histórica (2010-2023)

Tabela 19 - Características das Ondas de Calor identificadas na estação 82798

Nº evento	Nº dias	Data Início	Data extrema	Dias para data extrema	Intens Média (°C)	Tmax (°C) máx	Taxa Início (grau/dia)	Taxa Declínio (grau/dia)
1	3	13/12/17	13/12/17	0	1,15	32,80	0,40	0,08
2	3	28/12/18	30/12/18	2	1,45	33,20	0,25	0,59
3	4	07/01/19	09/01/19	2	1,30	33,00	0,12	0,27
4	4	17/01/19	17/01/19	0	1,32	33,00	0,60	-0,01
5	3	21/03/19	22/03/19	1	1,73	33,80	0,30	0,70
6	4	07/04/19	10/04/19	3	1,19	33,00	0,16	0,99
7	4	20/12/19	23/12/19	3	1,15	32,80	0,03	0,20
8	4	23/11/21	26/11/21	3	1,45	33,20	0,16	1,21
9	7	30/11/21	06/12/21	6	1,56	33,50	0,10	0,21
10	3	27/10/22	27/10/22	0	1,30	32,40	0,38	0,18
11	4	27/01/23	28/01/23	1	1,48	33,30	0,19	0,15
12	3	13/02/23	15/02/23	2	1,69	33,90	0,20	1,10
13	4	11/03/23	11/03/23	0	1,69	33,90	0,59	0,33
14	5	19/04/23	20/04/23	1	1,82	33,50	0,32	0,20
15	3	12/10/23	13/10/23	1	1,34	32,40	0,45	0,68
16	6	30/10/23	04/11/23	5	1,90	33,50	0,21	2,25
17	3	09/11/23	09/11/23	0	1,86	33,50	1,09	0,58

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 20 - Características das Ondas de Calor identificadas na estação 82800

Nº evento	Nº dias	Data Início	Data extrema	Dias para data extrema	Intens Média (°C)	Tmax (°C) máx	Taxa Início (grau/dia)	Taxa Declínio (grau/dia)
1	3	19/05/10	21/05/10	2	1,54	31,30	0,09	1,67
2	6	16/03/11	19/03/11	3	1,10	32,20	0,26	0,33
3	6	28/12/17	01/01/18	4	1,11	32,10	0,28	0,63
4	3	02/01/19	04/01/19	2	1,01	32,00	0,38	1,50
5	3	09/01/19	11/01/19	2	1,51	32,30	0,30	4,20
6	3	16/01/19	16/01/19	0	1,44	32,30	1,10	0,26
7	3	19/01/20	19/01/20	0	1,11	31,70	1,11	0,18
8	3	12/04/20	14/04/20	2	1,44	32,00	0,31	2,98

9	5	22/11/21	22/11/21	0	1,22	32,10	0,89	0,16
10	3	01/12/21	03/12/21	2	0,90	31,80	0,07	0,41
11	3	13/04/22	13/04/22	0	1,16	31,80	0,82	0,06

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 21 - Características das Ondas de Calor identificadas na estação A320

Nº evento	Nº dias	Data Início	Data extrema	Dias para data extrema	Intens. Média (°C)	Tmax (°C) máx	Taxa Início (grau/dia)	Taxa Declínio (grau/dia)
1	3	11/04/13	11/04/13	0	1,21	32,50	0,42	0,14
2	3	28/04/15	29/04/15	1	1,36	32,30	0,29	0,32
3	3	09/05/15	09/05/15	0	1,39	32,00	0,53	0,01
4	3	25/10/18	27/10/18	2	1,06	31,80	0,14	0,62
5	3	29/10/18	31/10/18	2	1,07	32,00	0,20	0,72
6	4	10/11/18	13/11/18	3	1,18	32,40	0,12	0,52
7	3	17/11/18	17/11/18	0	0,98	32,20	0,58	0,20
8	3	08/01/19	10/01/19	2	1,28	32,60	0,14	1,80
9	4	23/12/19	23/12/19	0	1,41	32,90	1,31	0,21
10	9	12/01/20	18/01/20	6	2,00	33,50	0,12	0,33
11	3	08/02/20	09/02/20	1	1,79	33,60	0,96	0,50
12	4	16/02/20	16/02/20	0	1,42	33,00	0,80	0,34
13	3	26/02/20	27/02/20	1	1,45	33,00	0,17	0,29
14	5	05/04/20	06/04/20	1	1,47	33,50	0,85	0,34
15	4	11/04/20	14/04/20	3	1,63	33,00	0,26	3,18
16	3	29/08/20	29/08/20	0	1,39	30,50	0,59	0,29
17	3	02/10/20	04/10/20	2	1,03	31,30	0,23	0,43
18	4	09/10/20	09/10/20	0	1,14	31,60	0,57	0,25
19	5	03/12/21	05/12/21	2	1,54	33,40	0,52	0,66
20	3	18/01/22	18/01/22	0	1,58	33,00	1,30	0,41
21	3	07/04/22	08/04/22	1	1,14	32,40	0,55	0,12
22	3	07/10/22	08/10/22	1	1,12	31,50	0,14	0,36
23	5	26/12/22	30/12/22	4	1,47	33,10	0,32	1,09
24	3	12/01/23	14/01/23	2	1,60	33,10	0,43	3,01
25	7	29/01/23	03/02/23	5	1,42	33,10	0,07	0,54
26	3	19/02/23	21/02/23	2	1,81	33,90	0,58	2,30
27	3	05/03/23	07/03/23	2	1,32	32,90	0,10	0,80
28	5	10/03/23	14/03/23	4	1,60	33,40	0,20	1,30
29	5	12/05/23	15/05/23	3	1,68	32,50	0,29	0,97

30	3	10/10/23	12/10/23	2	1,24	31,80	0,13	0,72
31	5	19/10/23	22/10/23	3	1,48	32,40	0,28	0,55
32	4	28/10/23	30/10/23	2	1,54	33,10	0,62	1,12
33	6	07/11/23	09/11/23	2	1,65	33,30	0,54	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE 6 – Validação do modelo WRF

Abaixo são apresentados os resultados estatísticos da validação do modelo WRF (esquema Boulac) para os eventos EV01, EV02 e EV03. Os gráficos das variações horárias apresentados referem-se apenas ao EV02.

Tabela 22 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV01

T2 (°C)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (°C)	≤± 0.50	-1.849	-0.491	-0.689
MAGE (°C)	≤ 2.00	2.1	1.869	1.323
IOA	≥ 0.80	0.382	0.684	0.72
rh2 (%)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (%)	< ±10,00	6.605	-5.586	7.27
MAGE (%)	< 20,00	8.159	11.982	10.182
IOA	≥ 0,60	0.51	0.576	0.444
WSP10 (m/s)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (m/s)	≤± 0.50	4.004	-3.391	3.959
RMSE (m/s)	≤ 2.00	4.112	4.777	4.09

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 23 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV02

T2 (°C)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (°C)	≤± 0.50	-1.095	0.301	-0.849
MAGE (°C)	≤ 2.00	1.912	1.357	1.549
IOA	≥ 0.80	0.441	0.856	0.80
rh2 (%)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (%)	< 10,00	2.838	4.944	-4.495
MAGE (%)	≤ 20,00	7.349	9.369	7.965
IOA	≥ 0,60	0.607	0.793	0.75
WSP10 (m/s)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (m/s)	≤± 0.50	3.222	0.082	2.718
RMSE (m/s)	≤ 2.00	3.444	1.606	2.996

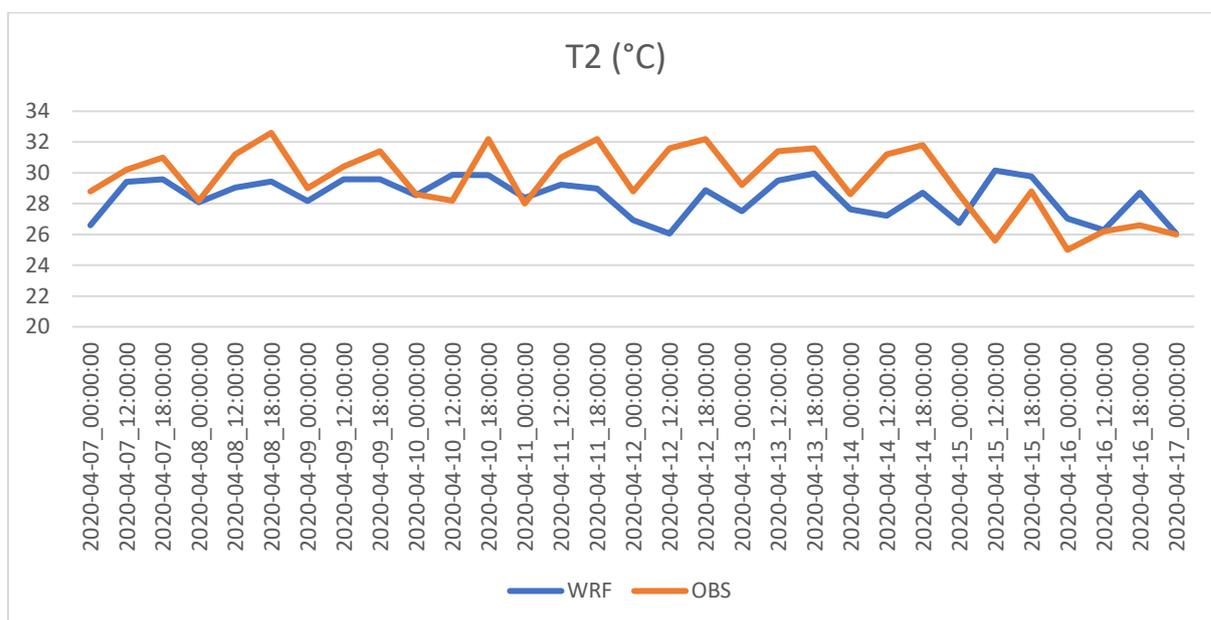
Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 24 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV03

T2 (°C)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (°C)	$\leq \pm 0.50$	-2.0527	0.643	-1.435
MAGE (°C)	$\leq 2.00$	2.0527	1.788	1.59
IOA	$\geq 0.80$	0.4692	0.54	0.742
rh2 (%)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (%)	$< 10,00$	-1.478	1.909	-7.272
MAGE (%)	$\leq 20,00$	6.786	7.435	8.812
IOA	$\geq 0,60$	0.613	0.815	0.676
WSP10 (m/s)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (m/s)	$\leq \pm 0.50$	Sem coleta	-1.116	-3.753
RMSE (m/s)	$\leq 2.00$	Sem coleta	1.768	4.054

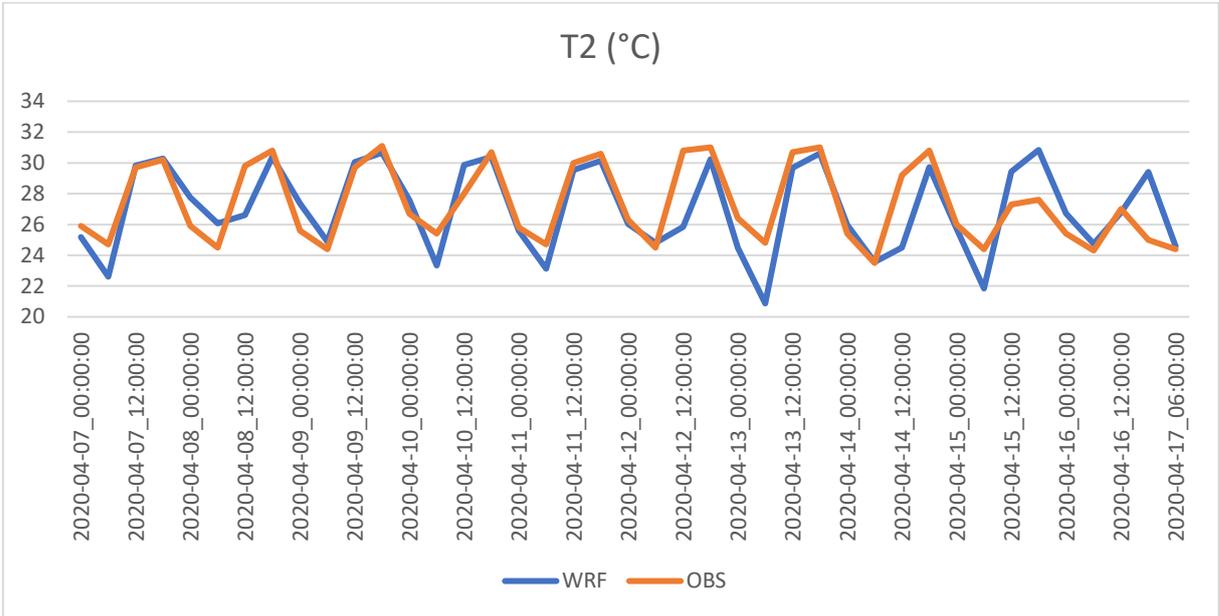
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 13 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação 82798)



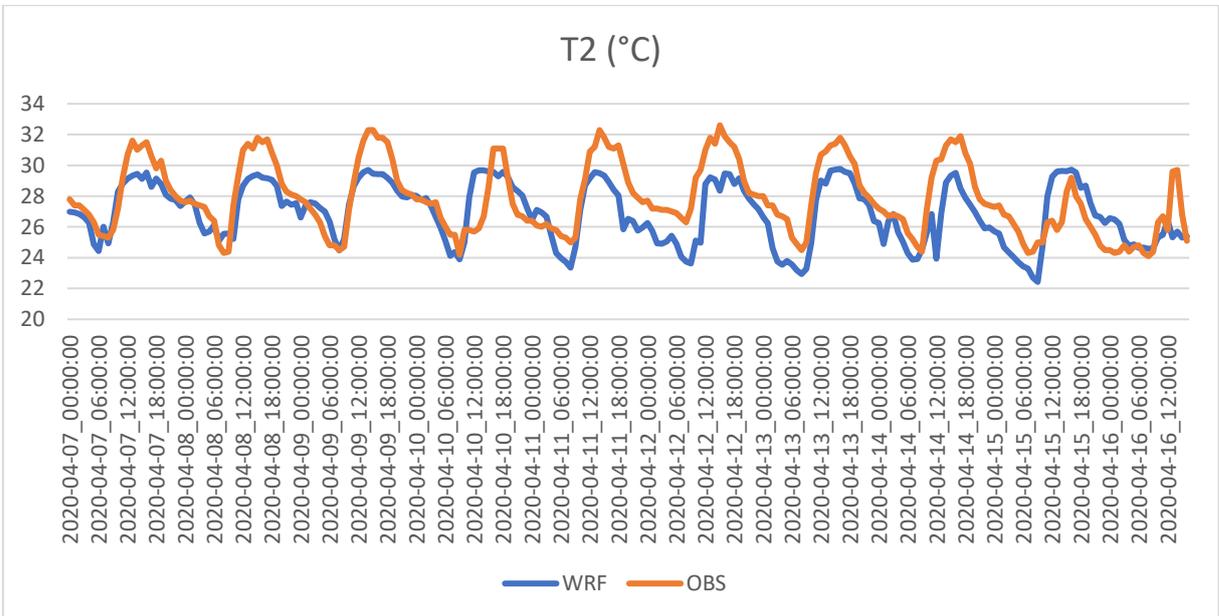
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 14 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação 82800)



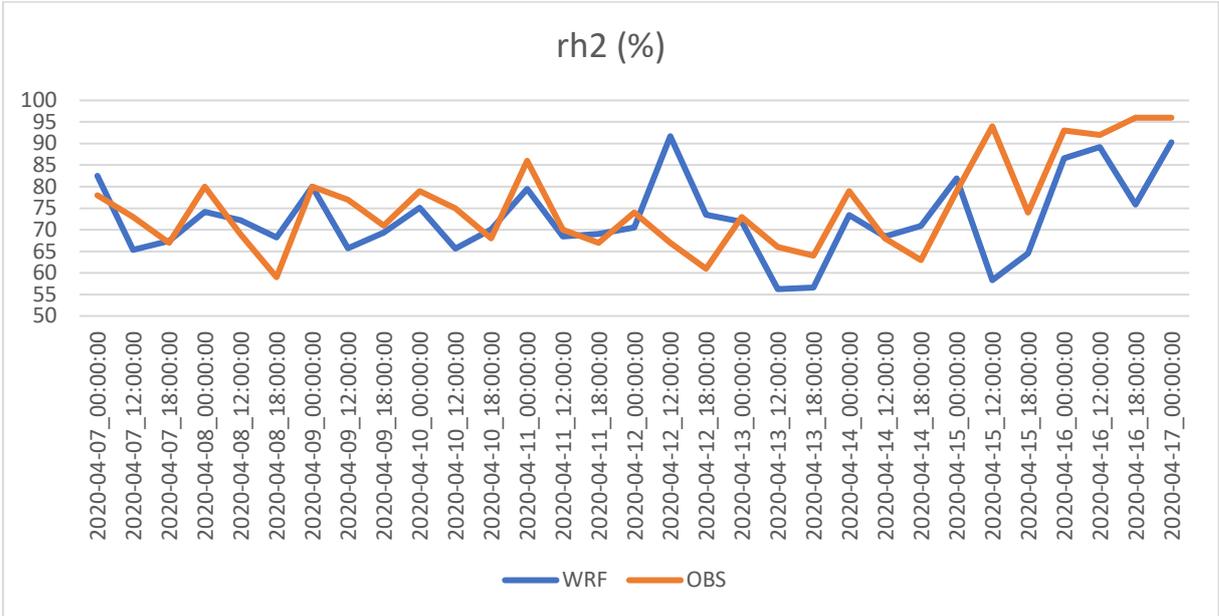
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 15 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação A320)



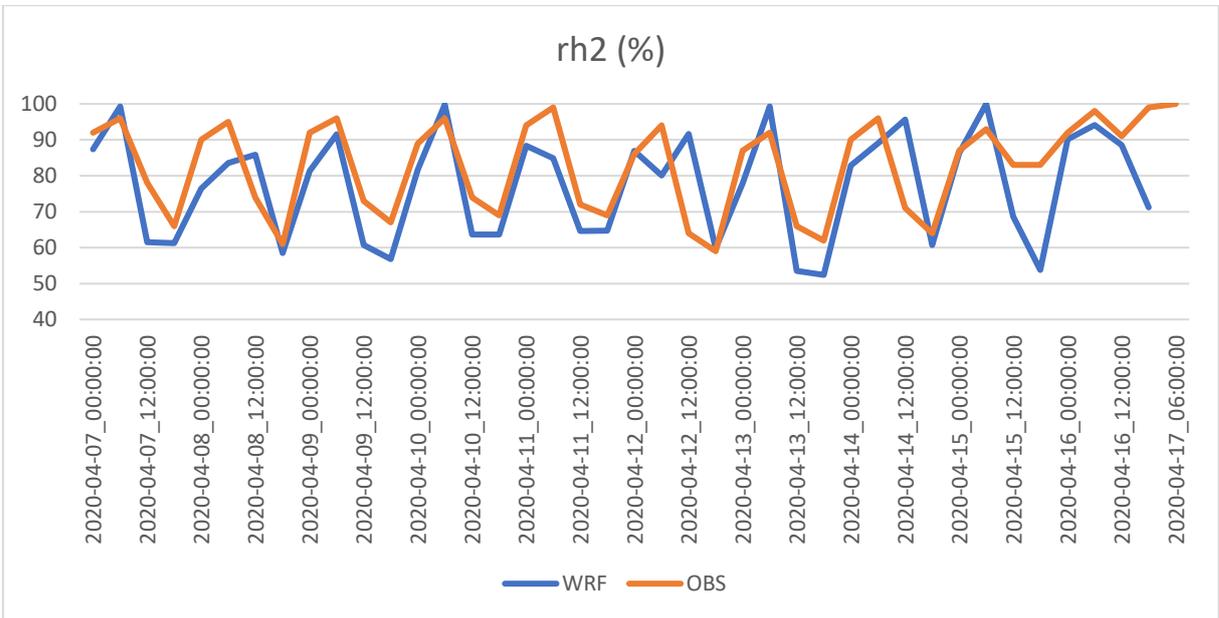
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 16 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação 82798)



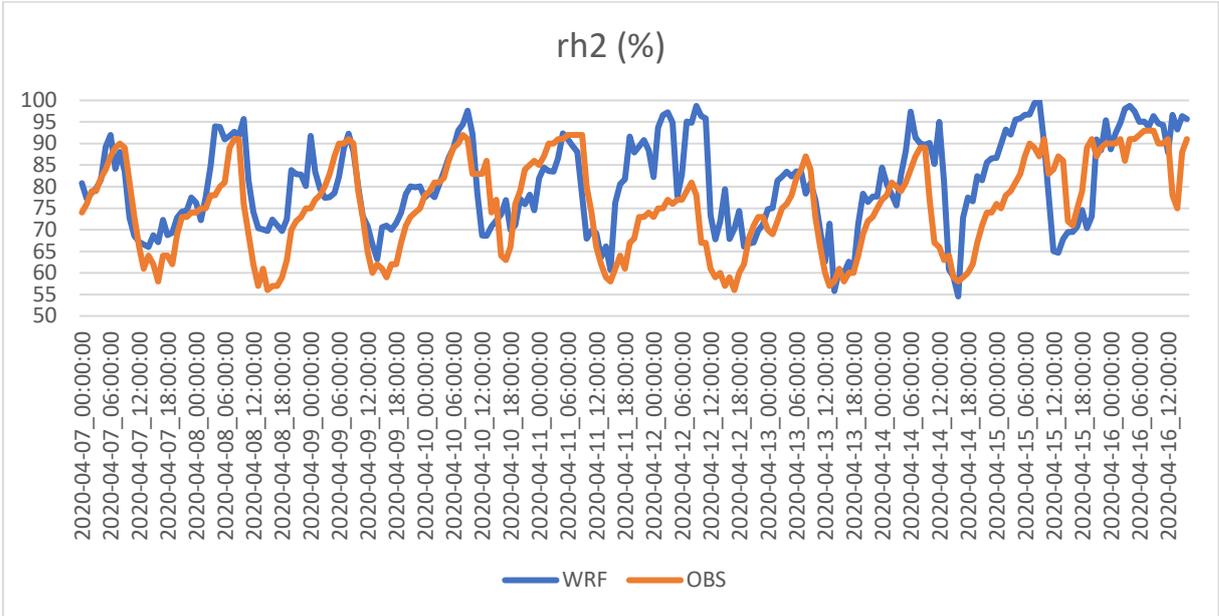
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 17 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação 82800)



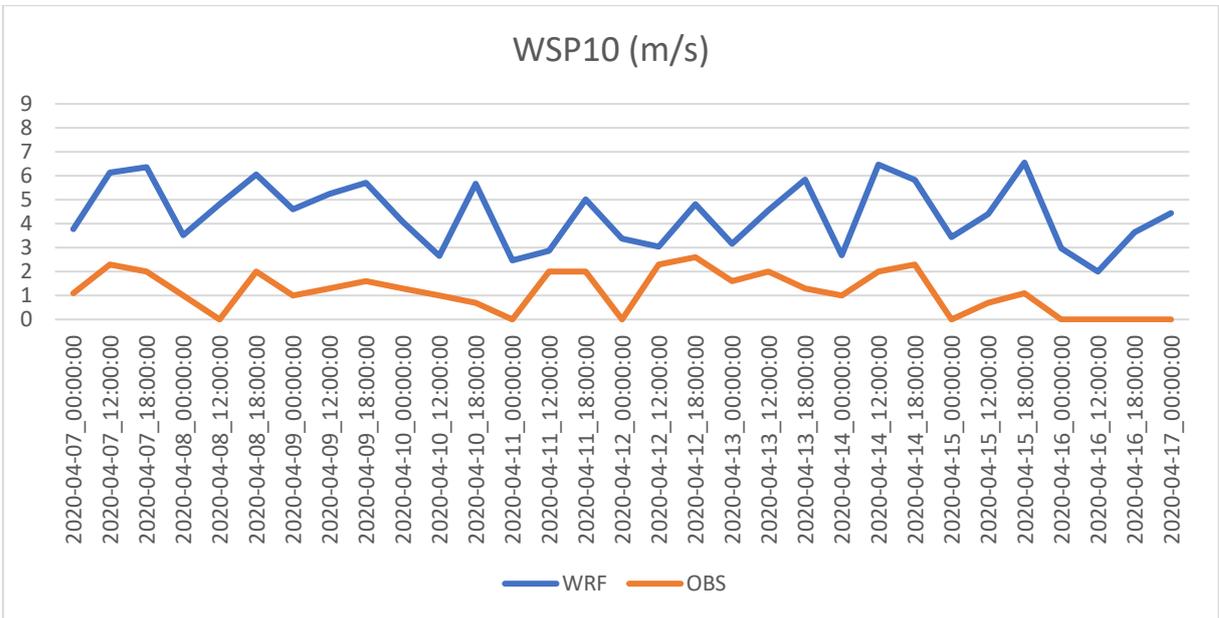
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 18 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação A320)



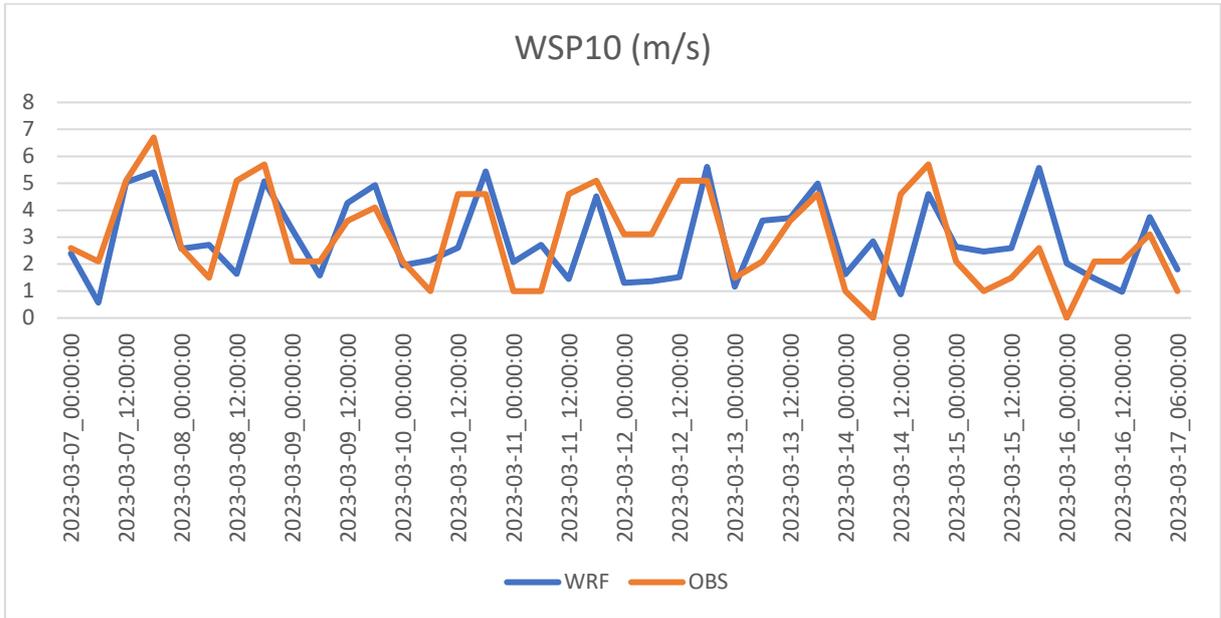
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 19 - Variação diária de WSP10 (m/s) modelado (WRF) e observado (estação 82798)



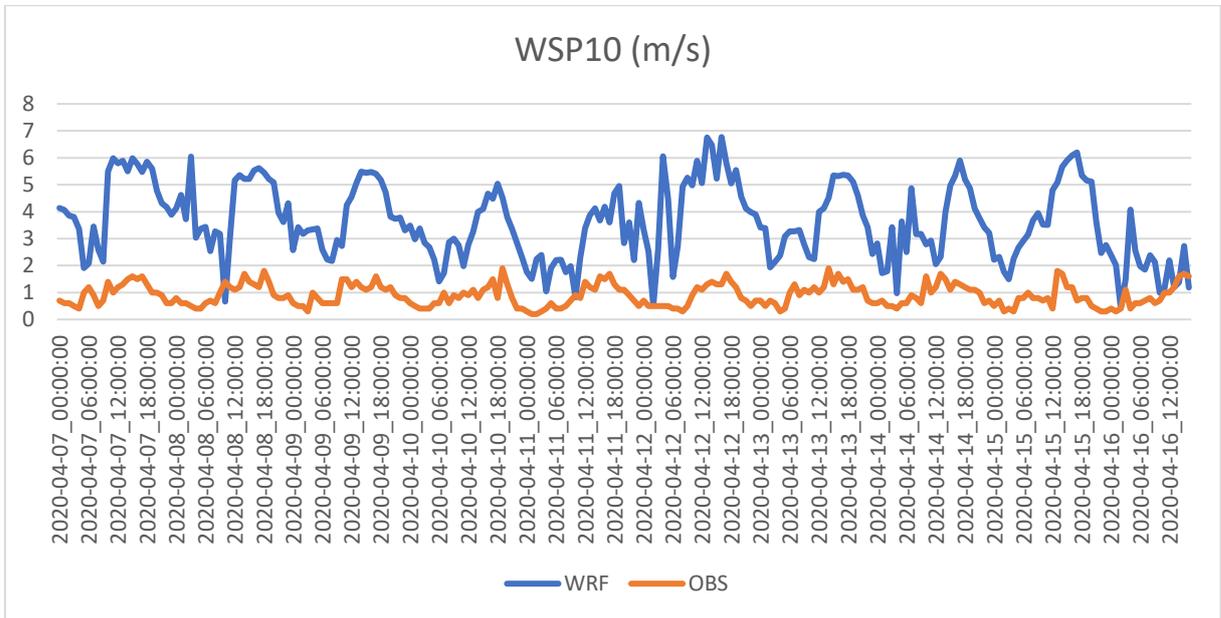
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 20 - Variação diária de WSP10 (m/s) modelado (WRF) e observado (estação 82798)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 21 - Variação diária de WSP10 (m/s) modelado (WRF) e observado (estação A320)



Fonte: Elaborado pelo Autor

A seguir são apresentados os resultados estatísticos da validação do modelo WRF (esquema YSU) para os eventos EV01, EV02 e EV03. Os gráficos das variações horárias apresentados referem-se apenas ao EV02.

Tabela 25 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV01

T2 (°C)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (°C)	≤± 0.50	-1,376	0,585	-0,406
MAGE (°C)	≤ 2.00	1,575	1,819	1,104
IOA	≥ 0.80	0,601	0,723	0,802
rh2 (%)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (%)	< ±10,00	0,907	-6,062	0,888
MAGE (%)	< 20,00	5,176	10,432	6,336
IOA	≥ 0,60	0,791	0,757	0,812
WSP10 (m/s)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (m/s)	≤± 0.50	4,363	-3,935	3,762
RMSE (m/s)	≤ 2.00	4,519	4,806	3,92

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 26 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV02

T2 (°C)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (°C)	≤± 0.50	-0,706	-0,172	-0,634
MAGE (°C)	≤ 2.00	1,759	1,377	1,532
IOA	≥ 0.80	0,558	0,874	0,805
rh2 (%)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (%)	< 10,00	-9,116	-12,602	-5,953
MAGE (%)	≤ 20,00	12,083	14,865	11,549
IOA	≥ 0,60	0,488	0,452	0,585
WSP10 (m/s)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (m/s)	≤± 0.50	3,784	-0,095	2,938
RMSE (m/s)	≤ 2.00	3,932	1,59	3,353

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 27 - Índices estatísticos para T2 (°C), rh2 (%) e WSP10 (m/s)– EV03

T2 (°C)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (°C)	≤± 0.50	-1,507	-0,516	-1,365
MAGE (°C)	≤ 2.00	2,219	2,219	1,566
IOA	≥ 0.80	0,496	0,496	0,764
rh2 (%)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (%)	< 10,00	-2,798	-5,068	4,612
MAGE (%)	≤ 20,00	1,566	9,664	8,57
IOA	≥ 0,60	0,764	0,725	0,718
WSP10 (m/s)				
Índice	Benchmark	WRF-ARW		
		82798	82800	A320
MB (m/s)	≤± 0.50	Sem coleta	-0,397	3,976
RMSE (m/s)	≤ 2.00	Sem coleta	1,07	4,32

Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 22 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação 82798)

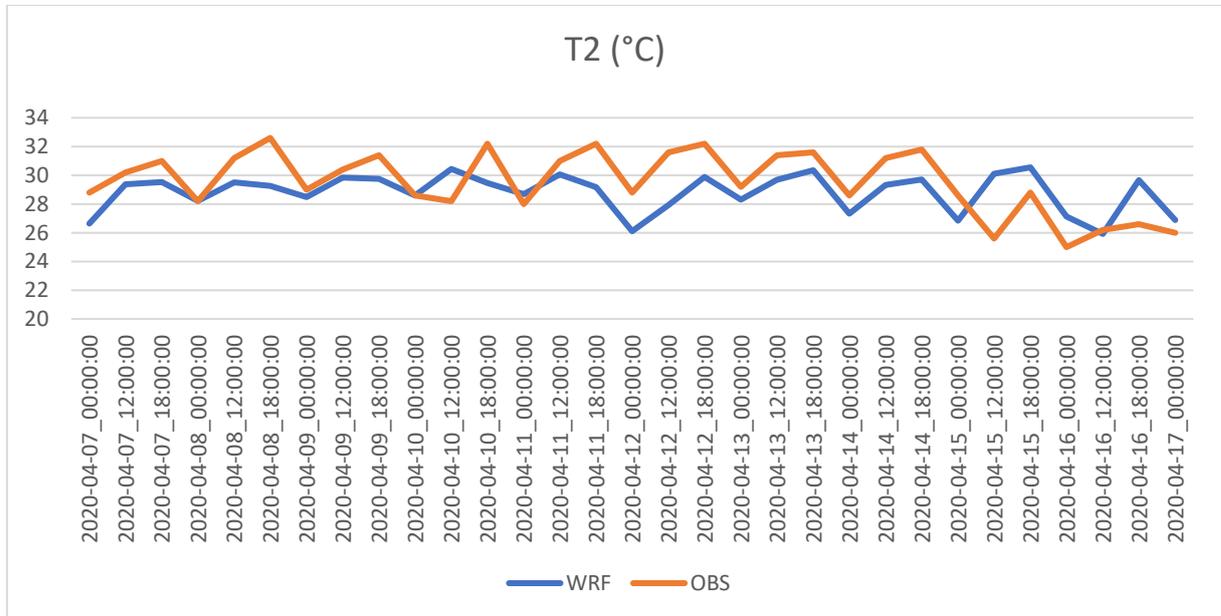
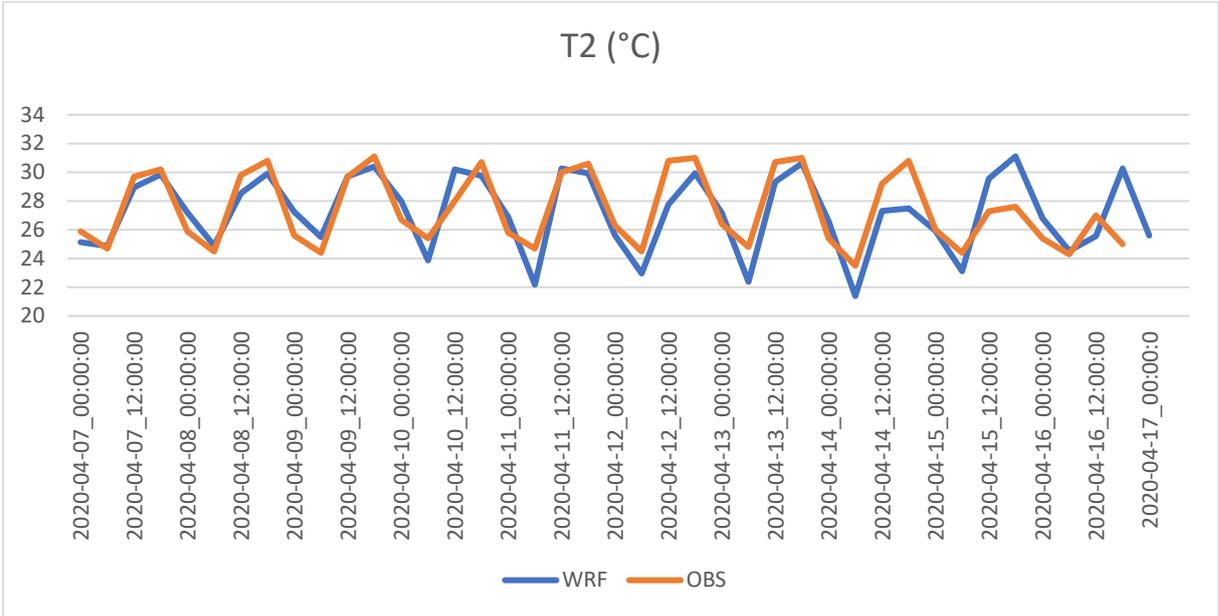
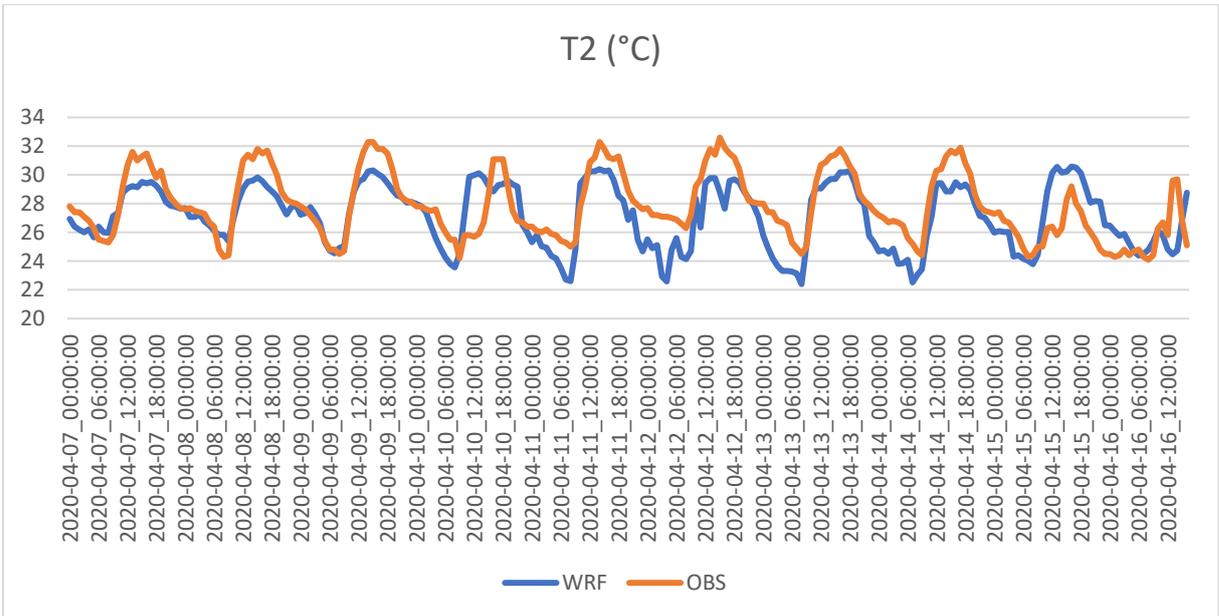


Gráfico 23 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação 82800)



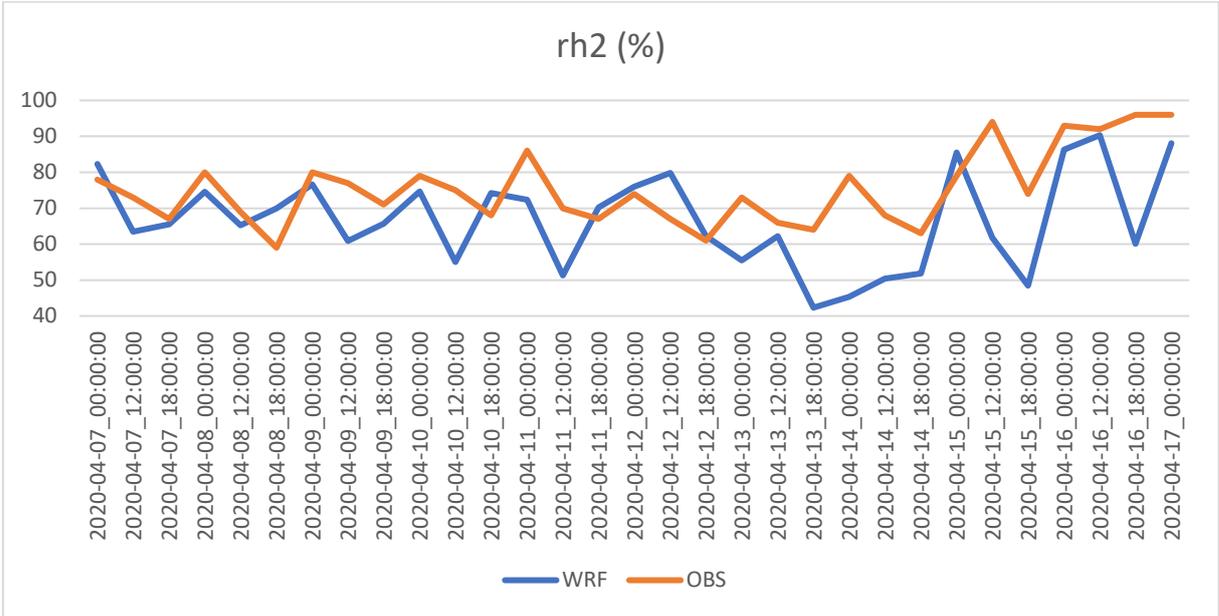
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 24 - Variação diária de T2 (°C) modelado (WRF) e observado (estação A320)



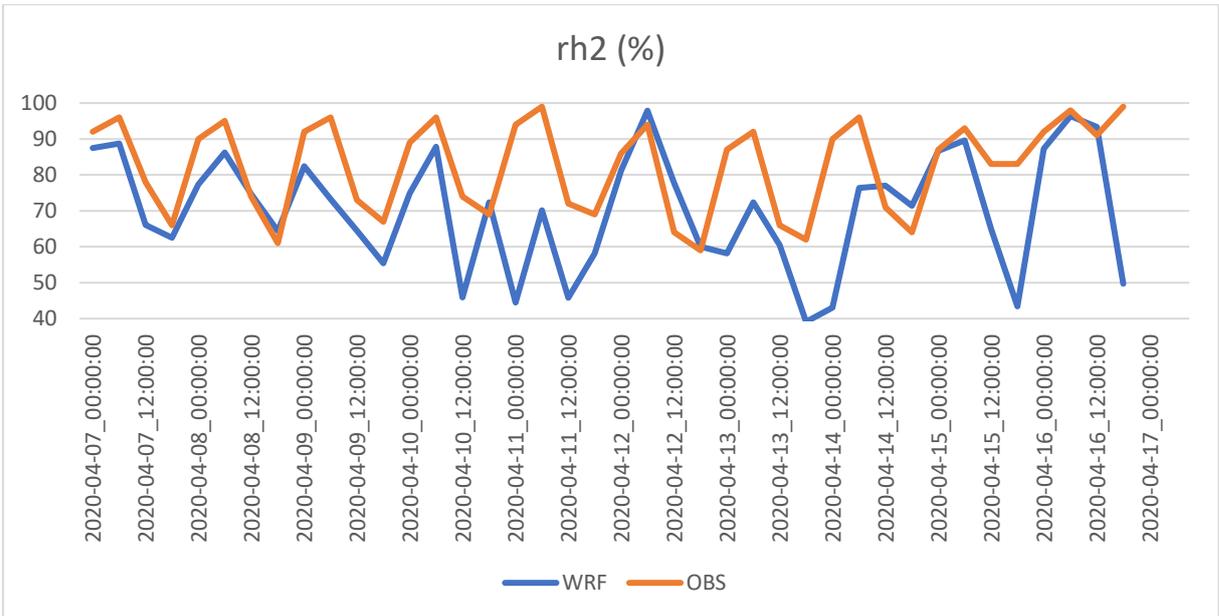
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 25 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação 82798)



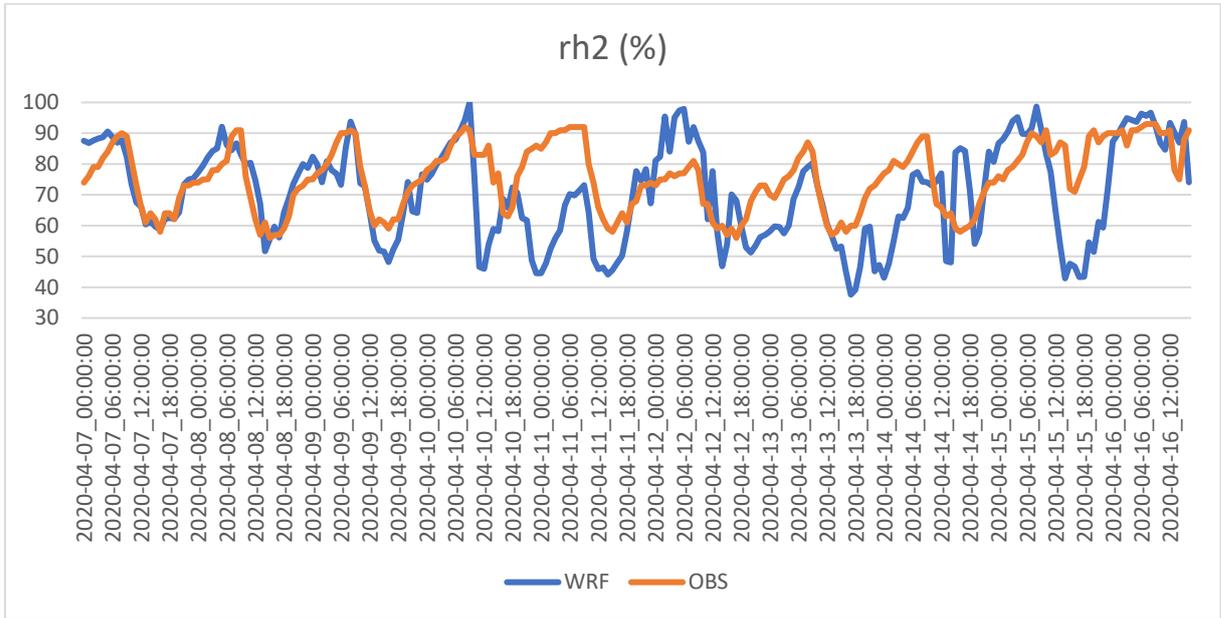
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 26 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação 82800)



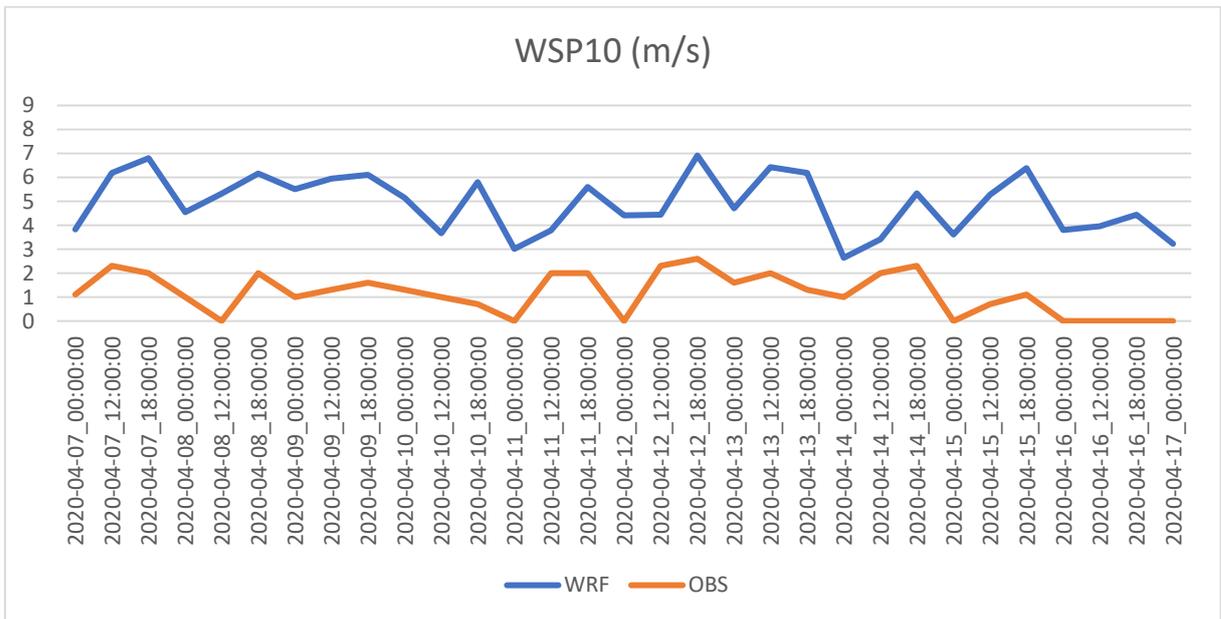
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 27 - Variação diária de rh2 (%) modelado (WRF) e observado (estação A320)



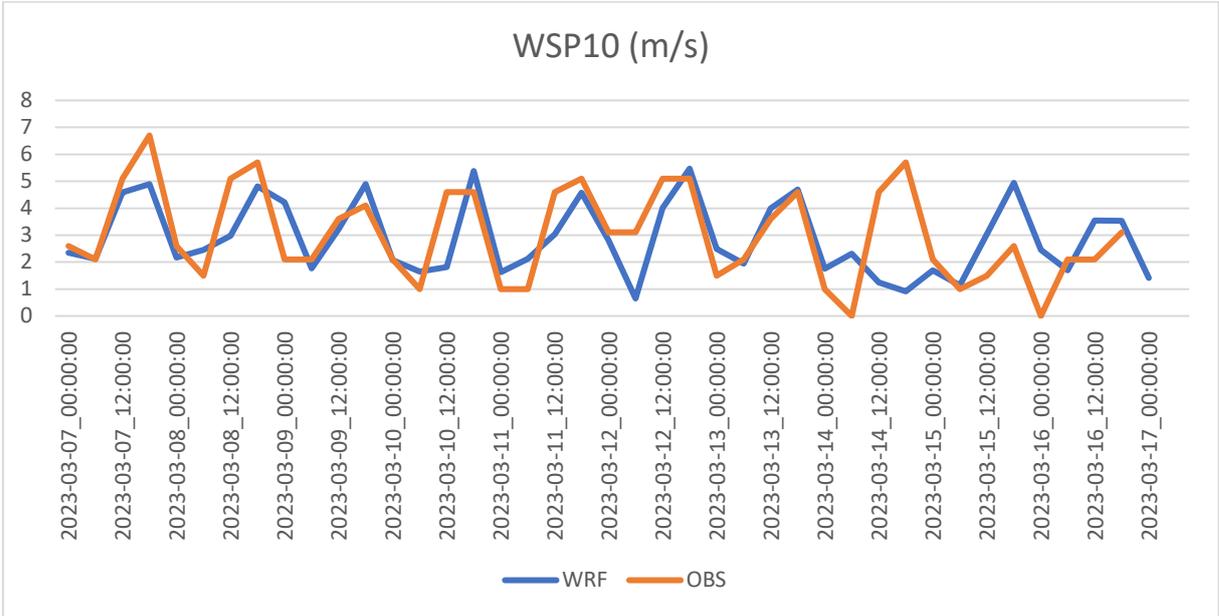
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 28 - Variação diária de WSP10 (m/s) modelado (WRF) e observado (estação 82798)



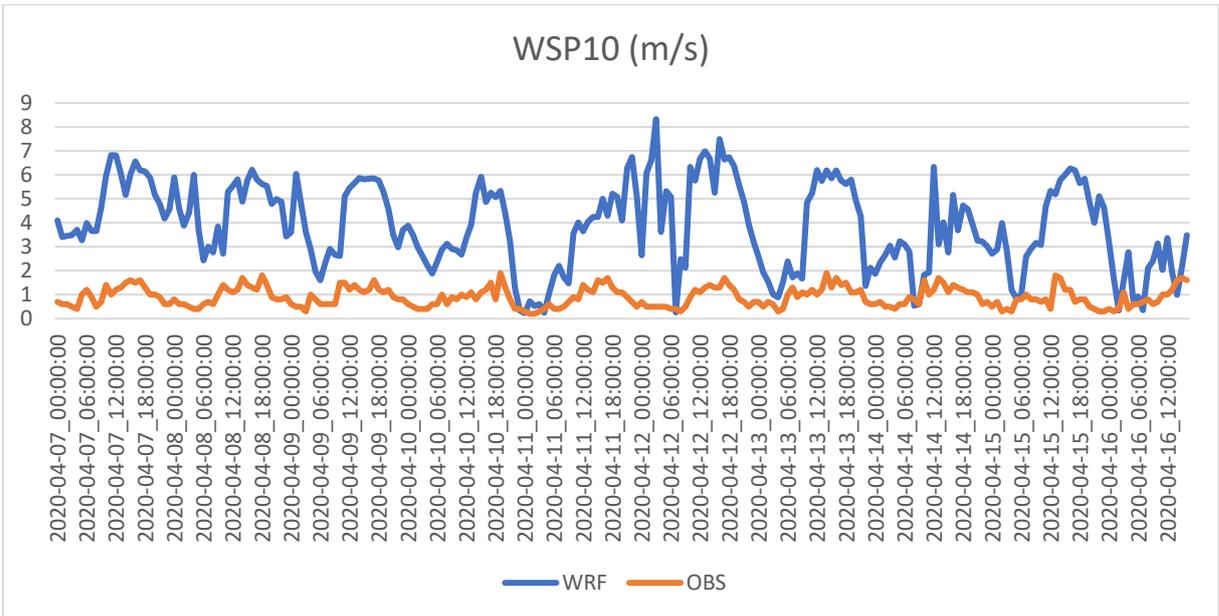
Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 29 - Variação diária de WSP10 (m/s) modelado (WRF) e observado (estação 82798)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 30 - Variação diária de WSP10 (m/s) modelado (WRF) e observado (estação A320)



Fonte: Elaborado pelo Autor

## APÊNDICE 7 – Tabela dos parâmetros climáticos por bairro – 13/04/2020 às 16h UTC

Os dados T2 (°C) rh2(%), RAD (W/m<sup>2</sup>), Qh (W/m<sup>2</sup>) e Qe (W/m<sup>2</sup>) foram extraídos do modelo WRF.

Tabela 28- Valores médios dos parâmetros climáticos por bairro - 13/04/20 às 16h UTC

Nome_do_ba	T2 (°C)	rh2 (%)	WSPEED (m/s)	RAD (W/m <sup>2</sup> )	Qh (W/m <sup>2</sup> )	Qe (W/m <sup>2</sup> )	Razão de Bowen (β)
Aeroclube	30,51	71,09	1,17	924,98	360,17	60,99	5,91
Água_Fria	30,83	67,30	1,11	924,42	323,61	147,28	2,20
Altiplano	30,33	74,75	1,02	922,67	316,87	125,06	2,53
Alto_do_Céu	30,88	69,85	1,27	924,56	231,33	243,72	0,95
Alto_do_Mateus	31,41	60,72	1,29	919,71	298,91	170,96	1,75
Anatólia	30,76	68,26	1,07	925,50	345,17	114,38	3,02
Bancários	30,64	69,39	1,01	923,59	332,85	141,25	2,36
Barra_de_Gramame	29,86	71,53	1,53	919,31	278,35	259,23	1,07
Bessa	30,03	74,48	1,04	922,64	291,87	58,29	5,01
Brisamar	30,43	70,88	0,77	925,20	353,55	61,02	5,79
Cabo_Branco	30,12	79,09	0,94	920,18	234,14	111,47	2,10
Castelo_Branco	30,64	70,49	1,14	923,67	327,92	143,55	2,28
Centro	31,12	67,58	0,75	922,38	356,21	56,95	6,26
Cidade_dos_Colibris	30,86	66,91	1,16	924,66	335,61	105,28	3,19
Costa_do_Sol	29,90	71,19	1,45	919,25	302,18	237,41	1,27
Costa_e_Silva	30,49	62,22	1,29	917,74	344,02	71,94	4,78
Cristo_Redentor	30,93	65,32	1,19	923,48	349,93	62,13	5,63
Cruz_das_Armas	31,23	64,96	1,27	923,16	343,33	84,36	4,07
Cuiá	30,11	64,13	1,23	920,69	322,88	130,68	2,47
Distrito_Industrial	30,09	62,31	1,25	915,40	312,08	174,11	1,79
Ernani_Sátiro	30,83	62,30	1,17	921,45	336,35	109,91	3,06
Ernesto_Geisel	30,44	63,74	1,27	921,62	350,60	60,92	5,76
Estados	30,77	68,48	0,82	925,15	348,59	69,18	5,04
Expedicionários	30,86	69,40	0,70	923,99	345,50	69,89	4,94
Funcionários	30,66	62,42	1,20	918,61	344,66	72,87	4,73
Gramame	29,99	63,61	1,22	914,69	291,36	233,11	1,25
Grotão	30,58	62,61	1,13	917,44	337,79	65,56	5,15
Ilha_do_Bispo	31,35	63,53	1,52	921,49	291,52	214,23	1,36
Indústrias	30,21	61,06	1,04	915,24	309,28	162,94	1,90
Ipês	30,69	69,29	1,14	925,64	338,55	121,53	2,79
Jaguaribe	31,14	67,29	1,29	923,80	335,22	99,09	3,38
Jardim_Cidade_Univer.	30,58	68,12	0,86	924,36	339,02	76,43	4,44
Jardim_Oceania	30,13	78,39	0,95	923,24	267,35	44,93	5,95
Jardim_São_Paulo	30,78	68,16	0,90	925,14	334,41	146,58	2,28
Jardim_Veneza	30,97	61,93	1,27	919,68	332,94	99,67	3,34

<b>João_Agripino</b>	30,49	68,98	0,92	925,77	348,45	61,16	5,70
<b>João_Paulo_II</b>	30,53	63,03	1,19	921,09	344,03	79,79	4,31
<b>José_Américo</b>	30,73	65,47	1,20	922,91	334,95	96,65	3,47
<b>Manaíra</b>	30,33	75,94	0,79	924,33	319,79	43,12	7,42
<b>Mandacarú</b>	30,84	68,63	0,93	925,78	327,86	123,56	2,65
<b>Mangabeira</b>	30,37	67,45	1,00	923,25	339,04	99,46	3,41
<b>Miramar</b>	30,48	72,63	0,88	924,54	355,30	93,02	3,82
<b>Muçumagro</b>	29,86	66,09	1,33	916,92	319,94	190,90	1,68
<b>Mumbaba</b>	30,29	60,10	1,32	917,09	252,85	300,40	0,84
<b>Mussurú</b>	30,17	62,00	0,00	915,79	242,69	332,18	0,73
<b>Oitizeiro</b>	31,04	62,97	1,24	921,81	334,92	93,60	3,58
<b>Padre_Zé</b>	31,01	68,32	1,05	924,50	301,82	202,42	1,49
<b>Paratibe</b>	29,98	67,36	1,18	920,46	316,76	179,59	1,76
<b>Pedro_Gondim</b>	30,51	68,93	0,88	925,73	350,70	57,67	6,08
<b>Penha</b>	29,12	78,59	1,32	918,05	284,84	51,82	5,50
<b>Planalto_da_Boa</b>	30,36	64,48	1,36	919,40	325,97	149,95	2,17
<b>Ponta_do_Seixas</b>	29,80	78,87	1,42	914,74	220,80	116,82	1,89
<b>Portal_do_Sol</b>	29,94	73,04	1,17	919,85	327,21	117,81	2,78
<b>Roger</b>	31,09	68,05	1,31	922,87	342,34	154,24	2,22
<b>São_José</b>	30,40	72,12	0,90	925,47	352,03	52,15	6,75
<b>Tambaú</b>	30,05	79,31	0,73	922,81	290,00	50,32	5,76
<b>Tambauzinho</b>	30,77	69,82	0,91	924,60	344,52	74,66	4,61
<b>Tambiá</b>	30,99	67,94	0,87	922,63	358,28	78,13	4,59
<b>Torre</b>	30,75	68,74	0,81	923,46	341,96	74,03	4,62
<b>Treze_de_Maio</b>	30,80	68,45	0,89	924,62	339,85	110,07	3,09
<b>Trincheiras</b>	31,27	65,87	1,25	923,04	347,68	52,52	6,62
<b>Valentina</b>	30,43	65,85	1,40	920,31	335,60	118,82	2,82
<b>Varadouro</b>	31,36	68,36	0,97	920,91	337,63	115,11	2,93
<b>Varjão</b>	30,97	67,39	1,11	924,85	328,32	133,81	2,45

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE 8 – Validação do modelo SpatialTc a partir do modelo Rayman Pro

Tabela 29 - Dados meteorológicos utilizados na validação do modelo SpatialTC

Ponto	T2 (°C)	rh2 (%)	WSPEED (m/s)	TRM (°C)	PET (°C)	PET (°C)
	WRF	WRF	UMEP	UMEP	UMEP	RAYMAN
1	30,19	67,32	1,23	45,12	35,85	35,80
2	30,56	75,48	1,45	36,81	31,27	32,00
3	30,29	71,19	1,33	30,55	30,27	29,20
4	30,44	76,11	1,14	46,99	37,41	37,20
5	29,87	78,08	1,07	32,27	30,60	29,90
6	30,29	78,61	1,24	43,11	34,70	35,00
7	29,54	71,37	1,05	44,87	36,00	35,50
8	30,69	68,31	1,33	29,93	31,20	29,30
9	29,49	66,64	0,78	45,37	36,11	36,20
10	29,39	65,96	0,58	44,46	34,80	36,20
11	30,23	63,72	1,36	31,41	34,33	29,20
12	30,62	60,19	1,03	29,32	30,93	29,10
13	30,99	60,62	0,82	43,60	36,35	36,50
14	31,36	66,16	1,54	30,05	31,33	29,90
15	30,58	61,01	1,46	29,29	30,02	28,60
16	31,05	62,49	1,29	45,28	37,24	36,40
17	31,20	69,59	1,24	29,01	30,34	29,05
18	31,19	64,50	1,33	34,52	32,26	31,70
19	30,99	67,45	1,33	29,22	31,09	29,30
20	30,82	68,19	0,66	31,48	35,76	30,80

Fonte: Elaborado pelo autor