ANÁLISE DA VERTICALIZAÇÃO NO MICROCLIMA URBANO E CONFORTO TÉRMICO. ESTUDO DE CASO: REGIÃO DAS 3 RUAS, JOÃO PESSOA-PB

Guilhardo Barros Moreira de Carvalho (1); Luiz Bueno da Silva (2); Ricardo V. R. Barbosa (3); Erivaldo Lopes de Souza (4)

(1) Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental/UFPB, Arquiteto e Urbanista, guilhardobarros@gmail.com, Universidade Federal da Paraíba

(2) Doutor, Coordenador e Pesquisador do Laboratório de Análise do Trabalho do DEP/CT/UFPB, bueno@ct.ufpb.br, Universidade Federal da Paraíba, Campus I - Centro de Tecnologia.

(3) Doutor, Professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, rvictor@fau.ufal.br, Universidade Federal de Alagoas, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Maceió/AL.

(4) Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental/UFPB, Eng. de Produção Mecânica e Técnico de Métodos Quantitativos/UFPB, elopesouza@gmail.com, Universidade Federal da Paraíba

RESUMO

Este artigo tem como objetivo analisar o efeito da verticalização no microclima do espaço urbano conhecido como "Três Ruas", no bairro Bancários, João Pessoa-PB. O estudo compara a situação atual com dois cenários hipotéticos de verticalização: um com 10 pavimentos e outro com até 20 pavimentos. A modelagem das edificações considerou a substituição das residências unifamiliares e edifícios comerciais por edifícios, mantendo as edificações verticais existentes. Utilizando o programa ENVI-met e o software Rayman Pro, foi calculado o índice de conforto térmico PET para avaliar as condições climáticas. Para simular o aumento das temperaturas causado pelas mudanças climáticas, selecionou-se o dia 23/11/2019, considerado o mais quente dos últimos 30 anos, representando o período quente e seco. Os resultados indicaram que a verticalização teve impacto significativo apenas na velocidade do ar, não afetando consideravelmente a temperatura e a umidade do ar. Observou-se uma pequena variação na temperatura radiante média com o aumento da verticalização. No entanto, verificou-se desconforto térmico, especialmente entre 15h e 18h, com base no índice PET. Conclui-se que a verticalização, por si só, possui um efeito insuficiente no controle do calor urbano. Portanto, é essencial analisar estratégias de mitigação adequadas durante o processo de urbanização, a fim de proporcionar um ambiente urbano mais confortável e adaptado às mudanças climáticas.

Palavras-chave: simulação computacional, espaço urbano, urbanização, mudanças climáticas.

ABSTRACT

This article analyzes the effect of verticalization on the microclimate of the urban space known as "Três Ruas", in the Bancários neighborhood, João Pessoa-PB. The study compares the current situation with two hypothetical verticalization scenarios: one with 10 floors and the other with up to 20 floors. The modeling of the buildings considered the replacement of single-family homes and commercial buildings by buildings, maintaining the existing vertical buildings. The PET thermal comfort index was calculated using the ENVI-met program and the Rayman Pro software to assess the climatic conditions. To simulate the increase in temperatures caused by climate change, 11/23/2019 was selected, considered the hottest in the last 30 years, representing the hot and dry period. The results indicated that verticalization had a significant impact only on-air velocity, not significantly affecting air temperature and humidity. A small variation in the mean radiant temperature was observed with increasing verticality. However, there was thermal discomfort, especially between 3 p.m. and 6 p.m., based on the PET index. It is concluded that verticalization, by itself, has an insufficient effect on the control of urban heat. Therefore, it is essential to analyze suitable mitigation strategies during urbanization to provide an urban environment that is more comfortable and adapted to climate change.

Keywords: computer simulation, urban space, urbanization, climate change.

1. INTRODUÇÃO

Desde as décadas de 1950 e 1960, tem havido uma crescente preocupação com a deterioração da qualidade ambiental no Brasil devido ao processo acelerado de urbanização. A paisagem urbana é um sistema complexo e heterogêneo, composto por uma variedade de elementos artificiais e recursos naturais. A morfologia urbana desempenha um papel significativo na variabilidade espaço-temporal do ganho de calor solar em superfícies urbanas, sendo um fator importante nas mudanças climáticas urbanas.

Diversos estudos sugerem que o aumento da temperatura nos centros urbanos é diretamente atribuído às atividades humanas (ABOELATA, 2021; ACERO *et al.*, 2020; HAMI *et al.*, 2019; TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018; YUAN *et al.*, 2017). A ocupação urbana está intimamente relacionada ao relevo, que influencia variações térmicas e determina os gastos com infraestrutura, resultando em custos mais elevados de urbanização, desconforto e contaminação ambiental (ALTUNKASA; USLU, 2020; APREDA; REDER; MERCOGLIANO, 2020; LIU; ZHENG; ZHAO, 2018; RAMYAR *et al.*, 2019; SU *et al.*, 2018). Os espaços livres urbanos desempenham um papel crucial na vida da população, promovendo o convívio, atividades físicas, lazer e proporcionando um ambiente com temperatura mais amena para os indivíduos que neles convivem.

Os modelos computacionais em várias escalas têm sido amplamente utilizados como ferramentas auxiliares na análise de diversos fenômenos espaciais. Estudos em microescala têm sido realizados com o auxílio desses modelos, permitindo a simulação de diferentes cenários para analisar o perfil térmico em espaços abertos. A simulação computacional oferece a possibilidade de compreender eventos relacionados ao clima e analisar estratégias antes de sua implementação, tanto em cenários reais quanto hipotéticos (SILVA; ROMERO, 2010). Essa abordagem tem sido amplamente aplicada em trabalhos didáticos e de pesquisa, proporcionando uma alternativa aos estudos de campo para obtenção de informações diagnósticas (CAMPOS, 2018; GUSSON, 2020; SHINZATO, 2014; SILVA, 2013; WERNECK, 2018).

O software ENVI-met é capaz de calcular o balanço de energia, levando em consideração variáveis como radiação, reflexão e sombreamento de edifícios e vegetação, fluxo de ar, temperatura, umidade, turbulência local e taxa de dissipação de calor, para análise das condições do microclima (BRUSE; FLEER, 1998; SIMON; SINSEL; BRUSE, 2020)

O conforto térmico, na escala microclimática, é um dos parâmetros mais relevantes para avaliar a qualidade ambiental proporcionada pela configuração urbana (GUSSON, 2020; SHINZATO, 2014; SILVA, 2013)(SILVA, 2013). Esse conceito abrange aspectos biológicos, físicos e emocionais, representando a sensação do ambiente térmico ao redor do indivíduo. O índice PET (Physiological Equivalent Temperature ou Temperatura Equivalente Fisiológica), desenvolvido por HÖPPE (1999), estabelece uma temperatura fisiológica equivalente em um determinado local, seja ao ar livre ou em ambientes fechados, com uma temperatura do ar que equilibra termicamente o corpo humano. Esse índice é utilizado na avaliação e monitoramento do componente térmico de diferentes microclimas urbanos em diversos domínios climáticos.

A problemática da pesquisa está relacionada à análise da ocupação e uso do solo e seu impacto no conforto térmico de uma área específica chamada "Três Ruas", localizada no bairro dos Bancários, na cidade de João Pessoa. A pesquisa utiliza o software de simulação computacional ENVI-met para investigar as condições microclimáticas e como a morfologia urbana tridimensional afeta a distribuição de calor solar na área de estudo. A pergunta da pesquisa é: Como a ocupação e uso do solo na área de "Três Ruas" influenciam o conforto térmico e as condições microclimáticas? A pesquisa busca compreender como a configuração urbana, incluindo a presença de edifícios, vegetação e outros elementos, afeta a temperatura, umidade, fluxo de ar e outros fatores relacionados ao microclima, utilizando o ENVI-met como ferramenta de modelagem.

Portanto, a pesquisa tem como foco investigar a relação entre a ocupação do solo, a configuração urbana e o conforto térmico em uma área urbana específica, com o objetivo de fornecer informações úteis para o planejamento e desenvolvimento urbano, visando a melhoria da qualidade ambiental e do bem-estar dos habitantes locais.

2. OBJETIVO

Realizar uma análise do impacto da verticalização na dinâmica microclimática dos espaços livres e áreas adjacentes na região conhecida como "Três Ruas" em João Pessoa, Paraíba.

3. MÉTODO

O método adotado neste estudo consiste em uma análise comparativa de diferentes configurações de verticalização, com o objetivo de avaliar quantitativamente os efeitos de cada cenário simulado utilizando o software ENVI-met. O procedimento metodológico deste trabalho é dividido em quatro etapas principais: 1)

Caracterização da área de estudo e elaboração dos cenários; 2) Caracterização climática; 3) Realização da simulação computacional utilizando o programa ENVI-met 4.0 e cálculo do índice de conforto térmico PET com o Rayman Pro; 4) Seleção de dados e análise dos resultados.

3.1 Caracterização da área de estudo e ponto de medição

João Pessoa, capital do Estado da Paraíba, está localizada na região Nordeste do Brasil, com coordenadas geográficas de 7,11° de latitude sul e 34,86° de longitude oeste. Situada a uma altitude de 40 metros acima do nível do mar, a cidade possui um clima classificado como As-tropical com estação seca durante o verão, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. Com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), João Pessoa tinha uma população de 723.515 habitantes em 2010, com uma estimativa de 889.600 habitantes em 2022. A área da cidade abrange 211 km² (IBGE, 2010, 2023).

O objeto de estudo desta pesquisa é um trecho específico denominado popularmente de "Três Ruas", localizado no bairro dos Bancários, como ilustrado na Figura 1 e 2. Essa região é composta por três vias públicas e apresenta um padrão predominante de ocupação residencial unifamiliar, com poucos estabelecimentos comerciais e serviços. A área total do trecho é de 2,18 km², abrigando uma população de 11.863 habitantes de acordo com o IBGE de 2010.

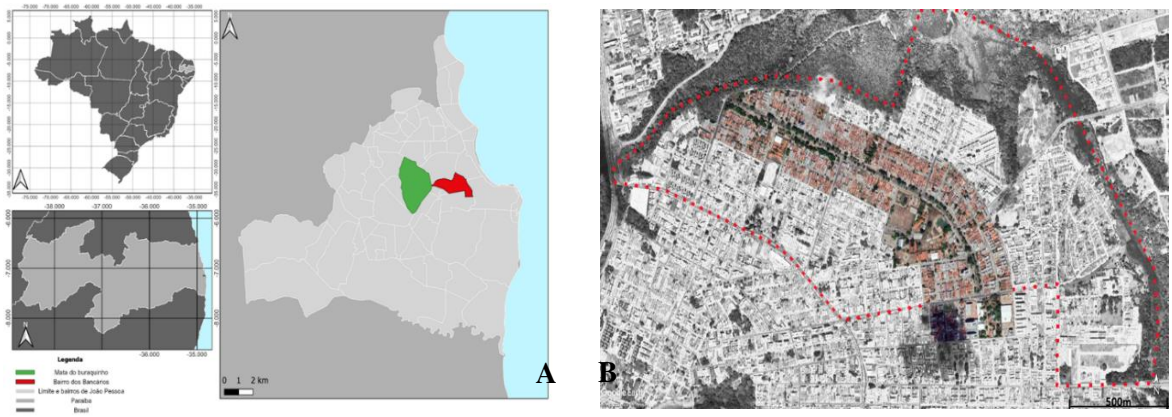

Figura 1 – Localização da área de estudo (A) (Fonte: Autor, 2023) (B) Área de estudo (Fonte: Adaptada pelo Autor do Google Earth, 2023).

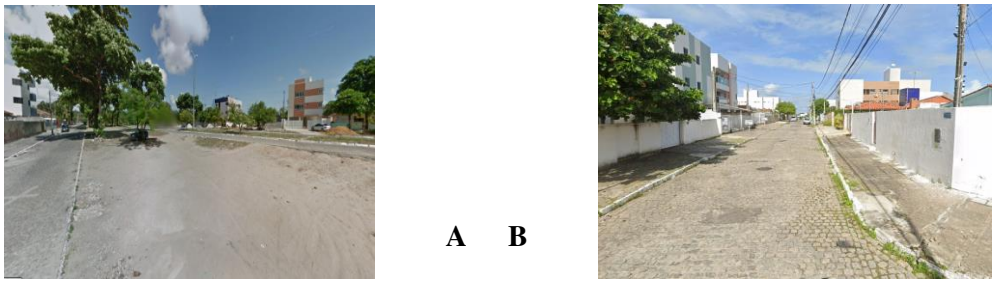

Figura 2 – Fotografias da área de estudo (Fonte: Autor, 2023).

Conforme as Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022), os dados referentes à temperatura do ar na cidade de João Pessoa indicam uma faixa de valores médios mensais entre 25,2°C e 28,1°C. As temperaturas mínimas ocorrem nos meses de junho, julho e agosto, com registros de até 21,9°C. Por outro lado, as temperaturas máximas são observadas em dezembro e fevereiro, atingindo valores entre 30,9°C e 31,2°C, sendo fevereiro o mês mais quente.

No que diz respeito à umidade relativa do ar, as médias mensais situam-se em torno de 72,4% a 82,1%. As umidades relativas mínimas ocorrem entre outubro e dezembro, enquanto as máximas são registradas de maio a julho. Em relação à precipitação mensal, os valores máximos variam de 235,7 mm (em maio) a 368,7 mm (em julho). Já as mínimas são observadas entre outubro (72,4 mm) e dezembro (73,1 mm).

A área de estudo foi dividida em três setores devido à limitação do programa, conforme ilustrado na Figura 3B. A área em estudo é predominantemente classificada como Uso Residencial 3 (Figura 3A). A base para a criação dos cenários seguiu a planta cadastral atual, obtida no Site Oficial da prefeitura municipal.

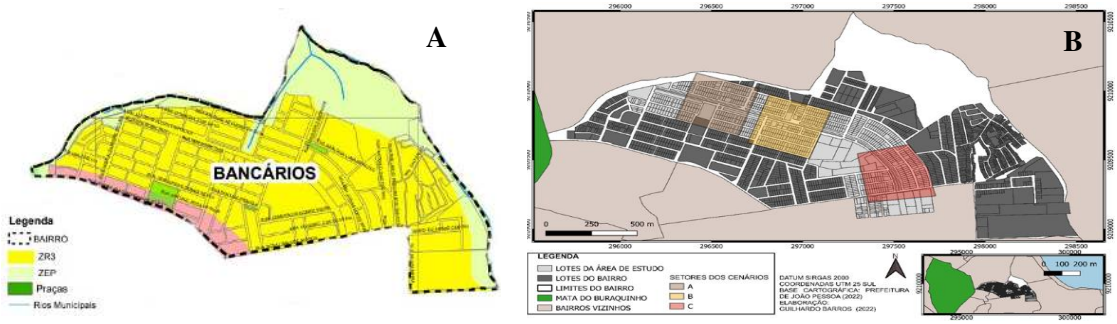

Figura 2 – Zoneamento do bairro da área de estudo (A) c (B) Setorização da área de estudo
Fonte: (Código de Urbanismo (2001); Autor, 2022).

Em seguida, foram criados três cenários que foram analisados por meio de simulação computacional: o primeiro representa a situação atual (cenário 1A), e os outros dois são cenários hipotéticos que consideram a verticalização, com edifícios em formato de torre, atingindo alturas máximas de 10 pavimentos (cenário 2A) e 20 pavimentos (cenário 3A), conforme mostrado na Figura 3. Quando possível, os lotes foram reorganizados de acordo com a legislação urbanística atual, o Código de Urbanismo (2001). A modelagem das edificações (Figura 3) considerou dois casos: a substituição das residências unifamiliares e edificações de térreo + 1 pavimento por edifícios multifamiliares e/ou comerciais, sem a remoção das edificações verticais existentes.

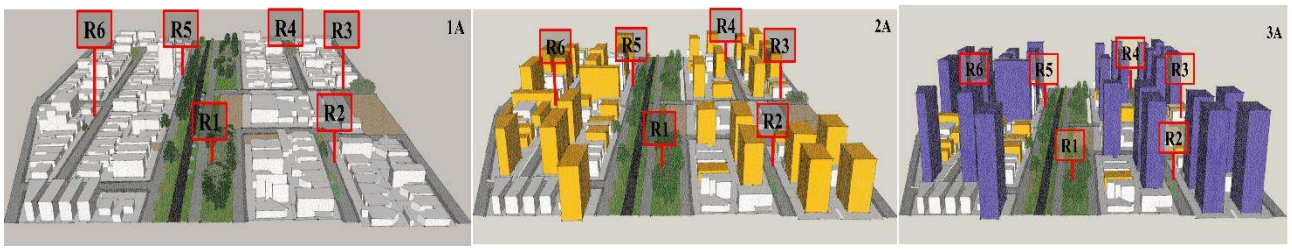

Figura 3 – Representação em 3D dos três cenários com os receptores (Autor, 2022).

Para realizar a simulação, foi selecionado o setor A da área de estudo. Nesse setor, foram posicionados seis receptores para coletar dados das variáveis microclimáticas, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar e temperatura radiante média. Esses receptores foram colocados a uma altura de 1,5m em relação ao nível do solo, representando diferentes configurações urbanas, conforme mostrado na Figura 3.Para determinar o fator de visão do céu (FVC), utilizou-se a ferramenta Sky View Analysis_Sketchup, por meio da qual foram obtidos os valores correspondentes, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valor do Fator de Visão do Céu (FVC) para os receptores e seu respectivo cenário simulado.

Cenário	RECEPTORES					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
1A	0,64	0,73	0,79	0,78	0,54	0,84
2A	0,64	0,50	0,78	0,64	0,53	0,57
3A	0,58	0,43	0,71	0,49	0,48	0,46

3.2. Caracterização climática

Para simular os efeitos do aumento das temperaturas decorrente das mudanças climáticas, utilizou-se o dia 23/11/2019 (Tabela 2) como representante das temperaturas mais altas no período quente e seco (setembro a março) dos anos de 1991 a 2020, conforme dados da Normais Climatológica do Brasil 1991-2020 e das estações automáticas (A320) e convencionais (82798) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022).

Tabela 2 - Dia representativo do período quente-seco.

Hora (UTC)	Temperatura Ins. (ºC)	Umidade Ins. (%)	Ponto Orvalho Ins. (ºC)	Pressão Ins. (hPa)	Velocidade Vento (m/s)	Direção Vento (m/s)	Rajada de Vento (m/s)	Radiação (KJ/m²)
600	25	76	20,5	1006,6	0,6	127	3,1	-
900	26,3	72	20,8	1007,8	1,1	101	3,2	173,6
1200	28,6	57	19,1	1009,1	1,6	108	5	1936,2
1500	30,7	51	19,3	1007,4	1,3	106	5,1	3202,8
1800	29,3	59	20,4	1006,2	1,5	104	6,5	2075,2
2100	26,4	68	20,1	1007	1,6	98	6	7,3

3.3. Aplicação da simulação computacional utilizando ENVI-met 4.0 e Rayman PRO

Para a modelagem dos cenários, foi determinada uma grade de modelagem com a configuração máxima de 180x180x35 células. No entanto, optou-se por utilizar uma grade de 170x170x30 células, com dimensões de 2x2x3m por célula, deixando cinco células nas bordas sem informações. Dessa forma, a área simulada resultou

em 340x340x90m. Os materiais de construção adotados foram padronizados para todos os cenários, com as seguintes características: os lotes foram completamente impermeabilizados; as superfícies horizontais consistiram em concreto dentro dos lotes e nos mesmos materiais atualmente utilizados nas vias, como asfalto e paralelepípedo; as calçadas foram feitas de concreto cinza, enquanto alguns passeios foram feitos de terra; as edificações foram construídas com tijolo cerâmico, telha cerâmica e metálica, seguindo o padrão do bairro.

Os dados meteorológicos utilizados na simulação foram obtidos da estação climatológica automática (A320) localizada na cidade de João Pessoa-PB. No início da simulação, foram inseridos os seguintes dados: velocidade do vento a 10 metros da superfície com valor de 1,1 m/s; direção do vento em graus, sendo 116°; rugosidade do solo igual a 0,1; temperatura do ar a 2 metros de altura igual a 27,32°C; umidade específica a 2.500 metros de altura igual a 9,05 g/kg; e umidade relativa a 2 metros de altura igual a 66%. A ferramenta Simple Forcing foi utilizada para a simulação, inserindo os dados horários de temperatura do ar e umidade do ar da estação automática (A320). A simulação foi iniciada às 21:00h do dia 21/11/2019, totalizando 51 horas, sendo as primeiras 24 horas descartadas para estabilizar os dados.

A avaliação do conforto térmico foi realizada por meio do índice PET, utilizando o software Rayman Pro, uma vez que a versão gratuita do ENVI-met não abrange o cálculo desse índice. Para as condições do dia 23 de novembro de 2019, foram utilizados os dados de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento como entrada, juntamente com os dados geográficos de João Pessoa. Os dados pessoais foram definidos de acordo com a ISO 8996/2004, considerando uma altura de 1,75 m, peso de 70 kg, idade de 35 anos e sexo masculino. O nível de atividade foi estabelecido como 165 W/m² (295 W), correspondendo a uma caminhada leve em superfície plana a 4 km/h. O isolamento térmico da roupa foi definido como 0,5 clo, correspondendo a uma roupa de verão conforme a ISO 7730/2005. Os dados foram extraídos nos horários de 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h, conforme indicado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Os gráficos e os cálculos das variáveis (temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento e temperatura radiante média) foram gerados utilizando o programa RStudio 2023.03.0 na linguagem R.

4. RESULTADOS

A partir da análise dos dados extraídos a cada 30 minutos de temperatura do ar, Figura 4, realizou-se a avaliação do comportamento dos receptores (R1, R2, R3, R4, R5 e R6) nos cenários 1A, 2A e 3A. No receptor R1, as temperaturas variaram de 24,84ºC a 29,94ºC ao longo do dia, atingindo o pico por volta das 16:30h nos cenários 1A e 2A, e 29,76ºC no cenário 3A, com uma subsequente diminuição até as 23:59h. As temperaturas mais baixas foram registradas às 08:00h nos cenários: 24,84ºC (3A), 28,98ºC (2A) e 24,99ºC (1A). As variações diárias foram de 4,95ºC (1A), 4,96ºC (2A) e 4,92ºC (3A).

No receptor R2, as temperaturas começaram em 26,19ºC (1A) e 26,06ºC (2A), diminuindo para 26,29ºC (1A) e 26,16ºC (2A) no final do dia. O cenário 3A seguiu um padrão semelhante, com temperaturas variando de 24,66ºC (2A) e 24,58ºC (3A) às 08:00h, e alcançando o máximo de 30,23ºC (2A) e 30,09ºC (3A) às 16:00h. No entanto, foram observadas diferenças notáveis durante certos períodos, como o período entre 9:30h e 12:30h, quando o 1A foi mais quente em comparação aos outros cenários, e o final da tarde e à noite (17:00h às 20:30h), quando o 3A foi mais frio. No receptor R3, a temperatura variou entre 24,79ºC e 30,46ºC, com uma variação máxima de aproximadamente 5,67ºC. A temperatura diminuiu e atingiu o valor mais baixo às 08:00h nos cenários 1A (24,79ºC), 3A (24,79ºC) e 2A (24,83ºC), antes de aumentar novamente. O pico mais alto foi registrado às 16:00h no 1A (30,44ºC), 2A (30,46ºC) e 3A (30,27ºC). Observou-se que as temperaturas do 2A foram geralmente um pouco mais altas que nos outros cenários, especialmente durante a tarde.

O receptor R4 apresentou cenários com temperaturas semelhantes, começando em 26,27ºC (1A), 26,35ºC (2A) e 26,19ºC (3A). O pico de temperatura ocorreu às 16:00h no 1A (30,47ºC) e 2A (30,53ºC), e às 16:30h no 3A (30,64ºC), com posterior diminuição até o final do dia, resultando em 26,39ºC (1A), 26,47ºC (2A) e 26,47ºC (3A). No R5, as temperaturas variaram entre 24,7ºC e 30,73ºC, com uma variação máxima de aproximadamente 4,84ºC. Iniciaram-se em 26,02ºC (1A) e 26,29ºC (3A) e diminuíram para 24,71ºC (1A) e 25,96ºC (3A) às 08:30h. Posteriormente, aumentaram para um máximo de 30,59ºC (1A) e 30,73ºC (3A) às 16:30h, antes de diminuir para 26,12ºC às 23:59h. O padrão de temperatura no cenário 2A foi muito semelhante ao do 1A. No R6, a temperatura iniciou em 26,29ºC (1A) à meia-noite e diminuiu durante a noite, atingindo o mínimo de 25,01ºC (1A) e 25,12ºC (2A) às 08:30h. Em seguida, começou a aumentar, atingindo o pico de 29,99ºC (1A), 29,99ºC (2A) e 29,78ºC (3A) às 16:30h, antes de diminuir novamente até o final do dia. Portanto, a variação de temperatura foi de 4,98ºC no 1A, 4,85ºC (2A) e 4,68ºC (3A).

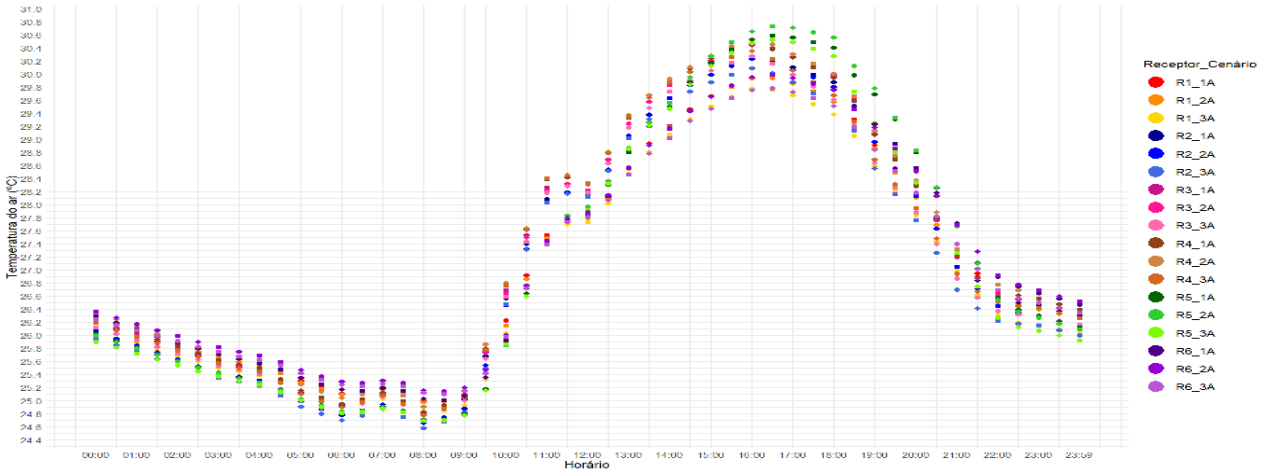

Figura 4 – Gráficos do comportamento da temperatura do ar (ºC) nos seis receptores (Autor, 2023).

Em geral, os dados revelaram uma variação na temperatura, com as mais altas ocorrendo durante a tarde e as mais baixas no início da manhã e à noite. As temperaturas nos receptores foram consistentes nos diferentes cenários ao longo da maior parte do dia, com pequenas variações entre eles. No entanto, a amplitude dessa variação e os valores máximos registrados variaram de acordo com cada cenário. Foi constatado que o comportamento apresentou similaridades nos horários. Embora não tenha sido observada uma diferença maior que 2ºC no mesmo horário entre os cenários para o mesmo receptor. Essa variação pode ser influenciada por diversos fatores, como a radiação solar, a umidade do ar e os ventos.

Observou-se que os receptores apresentaram temperaturas mais baixas no cenário 3A em comparação com os outros cenários, principalmente entre 00:00h e 09:00h, e a partir de 17:00h até o final do dia. Isso indica a possibilidade das trocas térmicas devido ao efeito residual da radiação solar e à liberação de calor dos materiais. Das 21:00h às 23:59h, os valores mostraram-se em torno de 26°C, indicando a possibilidade das trocas térmicas. Diversos autores (Acero et al., 2020; Gusson, 2020; Kropp et al., 2018; Shinzato & Duarte, 2018; Stark da Silva, Duarte, & Pauleit, 2023) também mencionam a influência desses fatores.

Os resultados revelam variações na umidade ao longo do dia (Figura 5). Essas variações ocorreram com uma amplitude de 27%, variando cerca de 50% a 77%. Os receptores R1 e R2 apresentaram comportamentos distintos. O receptor R1 mostrou níveis mais elevados de umidade em determinados momentos do dia, enquanto o receptor R2 apresentou valores mais altos pela manhã, diminuindo ao longo do dia e aumentando novamente no final do dia. O receptor R3 apresentou um comportamento bastante similar nos cenários, com uma pequena variação observada apenas no cenário 3A. Já o receptor R4 indicou valores mais baixos em certos momentos do dia no cenário 2A e em outros momentos no cenário 3A. O receptor R5 apresentou uma variação pontual no cenário 1A e valores ligeiramente mais altos no cenário 3A ao final do dia. Por fim, o receptor R6 registrou valores mais altos no cenário 1A pela manhã e no cenário 3A à tarde.

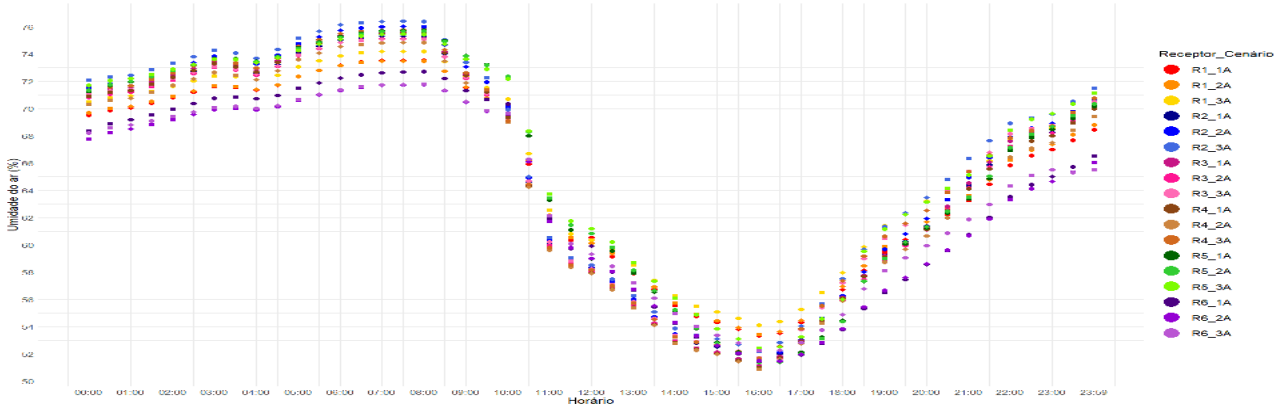

Figura 5 – Gráficos do comportamento da umidade do ar (ºC) nos seis receptores (Autor, 2023).

Em relação ao receptor R1, observou-se que a umidade foi mais elevada durante a manhã, diminuindo ao longo do dia e aumentando durante a noite. Os valores iniciais foram de 69,52% (cenário 1A), 69,68% (cenário 2A) e 70,49% (cenário 3A) à meia-noite, atingindo o máximo de 73,54% (cenário 1A), 73,48% (cenário 2A) e 74,21% (cenário 3A) às 7h. Posteriormente, a umidade diminuiu para o mínimo de 53,33% (cenário 1A), 53,44% (cenário 2A) e 54,12% (cenário 3A) às 16h. No receptor R2, a umidade oscilou entre 70,03% (cenário 1A), 71,55% (cenário 2A) e 72,08% (cenário 3A) no início do dia, alcançando o máximo de

75,31% (cenário 1A), 76,02% (cenário 2A) e 76,42% (cenário 3A) às 7h. Em seguida, houve uma queda para o mínimo de 51,49% (cenário 1A), 51,58% (cenário 2A) e 52,18% (cenário 3A) às 16h.

No receptor R3, a umidade teve início em torno de 71,16% (cenário 1A), 70,82% (cenário 2A) e 71% (cenário 3A) à meia-noite, atingindo o pico de 75,6% (cenário 1A), 75,11% (cenário 2A) e 75,09% (cenário 3A) às 7h30. Em seguida, a umidade diminuiu para 51,11% (cenário 1A), 51% (cenário 2A) e 51,71% (cenário 3A) às 16h. De modo geral, a variação da umidade foi suave, mantendo-se dentro de uma faixa de aproximadamente 20% ao longo do dia no cenário 1A, com um pico mais baixo pela manhã no cenário 2A e uma variação menor no 3A, porém com uma mudança mais acentuada na primeira metade do dia.

No caso do receptor R4, os valores iniciais situaram-se em torno de 70,91% (cenário 1A), 70,33% (cenário 2A) e 71,33% (cenário 3A) à meia-noite, aumentando até atingir o pico de 75,54% (cenário 1A), 74,86% (cenário 2A) e 75,77% (cenário 3A) às 7h30. Em seguida, houve uma queda gradual até atingir 51,01% (cenário 1A), 50,89% (cenário 2A) e 51,68% (cenário 3A) às 16h, seguida de um aumento à meia-noite. O receptor R5 mostrou uma umidade inicial de 71% (cenário 1A), 71,34% (cenário 2A) e 71,72% (cenário 3A), alcançando o pico de 75,74% (cenário 1A), 75,67% (cenário 2A) e 75,46% (cenário 3A) às 7h30. Posteriormente, a umidade diminuiu gradualmente para cerca de 51,38% (cenário 1A), 51,5% (cenário 2A) e 52,42% (cenário 3A) às 16h e, em seguida, começou a aumentar novamente até a meia-noite.

O receptor R6, a umidade iniciou em torno de 68,37% (cenário 1A), 67,78% (cenário 2A) e 68,2% (cenário 3A) à meia-noite, aumentando até atingir o pico de 72,71% (cenário 1A), 71,77% (cenário 2A) e 71,8% (cenário 3A) às 8h. Em seguida, a umidade diminuiu ao longo do dia, chegando a 51,44% (1A), 51,47% (2A) e 52,26% (3A) às 16h30. Essas variações na umidade ao longo do dia são influenciadas por diversos fatores, tais como temperatura, pressão atmosférica, presença de nuvens, atividades humanas e vegetação.

Foi observada uma variação na velocidade do ar ao longo do dia nos seis receptores analisados, conforme representado na Figura 6. Essa variação apresentou uma diferença de aproximadamente 0,55 m/s entre as velocidades mínimas e máximas registradas. No receptor R1 e no receptor R2, as velocidades mais altas foram observadas no cenário 1A, seguido pelo cenário 2A e, por fim, o cenário 3A. Embora não tenha ocorrido uma diminuição na velocidade maior do que 0,15 m/s em cada cenário, foi observada uma queda na velocidade do receptor R1 do cenário 1A ao meio-dia.

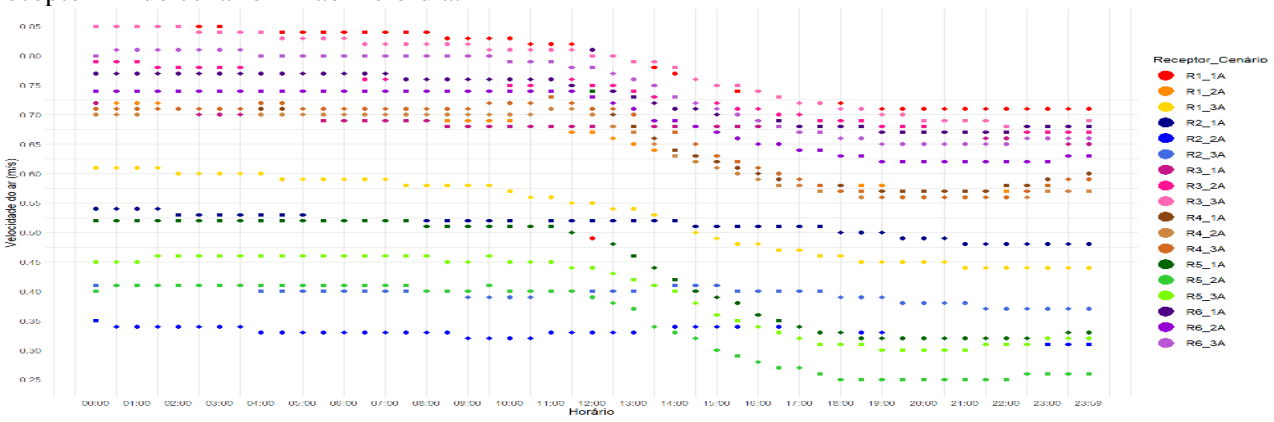

Figura 6 – Gráficos do comportamento da velocidade do ar (m/s) nos seis receptores (Autor, 2023).

O receptor R3 apresentou uma diminuição na velocidade até as 8:00, porém o cenário 1A mostrou uma estabilização até as 19:00, seguida por uma pequena diminuição até o final do dia, enquanto os outros cenários apresentaram uma queda mais acentuada na velocidade a partir das 8:00. No receptor R4, os cenários apresentaram poucas diferenças na velocidade, com estabilização a partir da meia-noite até as 8:00 nos cenários 1A e 3A, e até as 10:00 no cenário 2A. A velocidade diminuiu nos três cenários, seguida por uma estabilização entre as 18:00 e 21:30 no cenário 1A, e entre as 19:00 e 22:00 nos cenários 2A e 3A. Logo, houve um aumento.

No receptor R5, ocorreu uma pequena variação em cada cenário até as 11:30, seguida por uma diminuição até as 18:00 e uma variação menor até o final do dia, exceto por um aumento de 0,25 m/s no cenário 1A ao meio-dia. Quanto ao receptor R6, a velocidade permaneceu constante até as 11:00 no cenário 1A, seguida de um aumento pontual de quase 0,5 m/s ao meio-dia e uma queda até as 17:00, seguida por uma pequena variação posterior. No cenário 2A, a velocidade permaneceu constante até as 12:00, seguida de uma redução até as 19:00, uma estabilização até as 23:00 e, posteriormente, uma variação menor. O cenário 3A mostrou uma quase estabilidade (com pequena variação) na velocidade até as 11:00, uma diminuição gradual até as 19:00 e, em seguida, até as 23:00, seguida por um leve aumento até o final do dia.

Foi realizada uma análise da temperatura radiante média (TRM) em seis receptores, considerando diferentes cenários ao longo do dia, conforme ilustrado na Figura 7. Os resultados demonstraram que todos os receptores apresentaram variações semelhantes, com uma amplitude térmica de 56ºC. Houve uma tendência

de aumento da TRM a partir das 11:00h, atingindo seu pico entre as 17:00h e 18:00h, seguida por uma queda até as 21:00h. Os dados também revelaram flutuações significativas na TRM entre os diferentes cenários, destacando a importância de compreender e gerenciar a transferência de calor radiante nas superfícies em diversos ambientes. Cada receptor exibiu um comportamento distinto em cada cenário, com algumas diferenças entre eles. Em geral, os cenários 1A e 2A apresentaram TRM mais elevadas ao longo do dia, enquanto o cenário 3A mostrou uma variação menor da TRM.

No receptor R1, os três cenários exibiram comportamento semelhante. A TRM começou em 21,41ºC (cenário 1A), 21,39ºC (cenário 2A) e 20,9ºC (cenário 3A), diminuindo até alcançar 19,9ºC (cenário 1A), 19,89ºC (cenário 2A) e 19,60ºC (cenário 3A) às 06:00h. A partir das 10:30h, a temperatura começou a aumentar gradualmente, atingindo o pico de 60,97ºC (cenário 1A) e 60,52ºC (cenário 2A) às 16:30h, e 60,02ºC (cenário 3A) às 15:30h. Posteriormente, a temperatura diminuiu gradualmente, atingindo 21,78ºC (cenário 1A e cenário 2A) e 20,78ºC (cenário 3A) à meia-noite. No receptor R2, foram observadas diferenças entre os cenários. O cenário 1A apresentou os valores mais altos em alguns momentos. A TRM iniciou em 18ºC (cenário 1A), 17,9ºC (cenário 2A) e 17,4ºC (cenário 3A), diminuindo até 16,5ºC (cenário 1A) às 06:30h, 16,3ºC (cenário 2A) e 16,4ºC (cenário 3A) às 06:00h. Em seguida, a temperatura começou a aumentar novamente, atingindo cerca de 68,7ºC (cenário 1A) às 18:00h, 54,8ºC (cenário 2A) às 16:30h e 53ºC (cenário 3A) às 15:00h, antes de diminuir para aproximadamente 18,8ºC (1A), 18,4ºC (2A) e 17,8ºC (3A) às 23:59h.

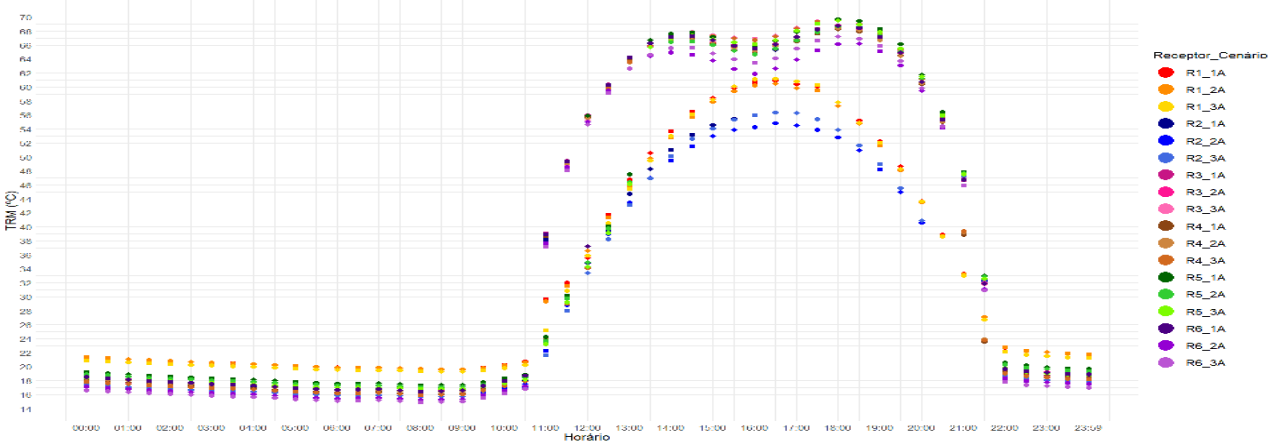

Figura 7 – Gráficos do comportamento da temperatura radiante média (TRM) (ºC) nos seis receptores (Autor, 2023).

No receptor R3, a TRM iniciou um aumento a partir da meia-noite, alcançando 16,46ºC (cenário 1A) às 06:30h, 16,44ºC (cenário 2A) e 16,07ºC (cenário 3A) às 08:00h. Em seguida, atingiu seu pico máximo de 68,81ºC (cenário 1A), 68,51ºC (cenário 2A) e 69,67ºC (cenário 3A) no final da tarde, por volta das 18:00h. A partir desse ponto, a temperatura começou a diminuir gradualmente, alcançando 18,91ºC (cenário 1A), 18,9ºC (cenário 2A) e 18,33ºC (cenário 3A) à meia-noite. No receptor R4, no cenário 1A, a temperatura iniciou em 18,11°C, no cenário 2A em 18,42ºC e no cenário 3A em 17,82ºC à meia-noite, diminuindo até atingir o valor mínimo de 16,05°C (cenário 1A), 16,35ºC (cenário 2A) e 15,94ºC (cenário 3A) às 08:00h. A temperatura então aumentou, alcançando o pico de 68,24ºC (cenário 1A), 68,47ºC (cenário 2A) e 69,63ºC (cenário 3A) às 18:00h, antes de diminuir para 18,49ºC (cenário 1A), 18,42ºC (cenário 2A) e 17,82ºC (cenário 3A) à meia-noite.

No receptor R5, a TRM iniciou em torno de 19,23ºC (cenário 1A), 18,9ºC (cenário 2A) e 18,46ºC (cenário 3A) à meia-noite, diminuindo ao longo da noite e atingindo o ponto mais baixo de 17,35ºC (cenário 1A), 17,09ºC (cenário 2A e cenário 3A) às 8:00h. Em seguida, a temperatura aumentou durante o dia, atingindo o pico de 69,73ºC (cenário 1A), 68,68ºC (cenário 2A) e 67,78ºC (cenário 3A) às 18:00h. Posteriormente, a TRM diminuiu novamente durante a noite, atingindo 19,64ºC (cenário 1A), 19,33ºC (cenário 2A) e 18,13ºC (cenário 3A) à meia-noite. No receptor R6, a TRM iniciou em 18,5ºC (cenário 1A), 17,1ºC (cenário 2A) e 16,64ºC (cenário 3A) à meia-noite, diminuindo até atingir o mínimo de 16,44ºC (1A), 15,22ºC (cenário 2A) às 08:00h e 15,35ºC (cenário 3A) às 09:00h. Em seguida, a TRM aumentou lentamente, atingindo o pico de 68,79ºC (cenário 1A), 66,21ºC (cenário 2A) e 67,22ºC (cenário 3A) às 18:00h.

A variação do índice PET foi avaliada em diferentes cenários e receptores, conforme apresentado na Tabela 3. O índice PET é uma medida utilizada para avaliar o desconforto térmico em humanos, considerando a temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. O valor do índice PET foi considerado com base na calibração realizada por Souza et al. (2016) para a cidade de Salvador/BA, aplicada por Silva (2017) e Souza (2019) para João Pessoa-PB e por Leal; Barbosa (2022) para Maceió-AL, em estudos em espaços abertos. Esses estudos classificaram o índice PET em quatro categorias: "muito quente" (PET ≥ 34,1ºC), "quente" (34,1ºC > PET > 29,4ºC), "pouco quente" (29,4ºC > PET > 26,8ºC) e "confortável" (PET ≤ 26,8ºC). Essas categorias fornecem uma referência para avaliar o desconforto com base nos valores da área em análise.

Observou-se um aumento gradual do desconforto térmico ao longo do dia, com os valores mais altos do índice PET registrados nos horários mais quentes (12:00, 15:00 e 18:00h). Os receptores R2, R3, R4 e R5 apresentaram valores mais elevados do índice PET em comparação ao R6, indicando maior desconforto nessas áreas. Os valores mais baixos foram registrados às 06:00 e 09:00h em todos os receptores, indicando maior conforto nesses horários, alguns receptores apresentavam valores indicativos de algum desconforto térmico.

Tabela 3 – Índices de conforto térmico PET para cada receptor nos três cenários (Autor, 2023).

HORÁRIO	R1 (1A)	R1 (2A)	R1 (3A)	R2 (1A)	R2 (2A)	R2 (3A)	R3 (1A)	R3 (2A)	R3 (3A)	R4 (1A)	R4 (2A)	R4 (3A)	R5 (1A)	R5 (2A)	R5 (3A)	R6 (1A)	R6 (2A)	R6 (3A)
06:00	20,5	20,9	20,9	19,8	20,2	19,7	19,4	19,2	18,9	19,2	19,4	19,1	20,2	20,4	20,1	19,4	19	18,7
09:00	20,4	20,7	20,8	19,8	20,1	19,7	19,5	19,3	18,9	19,3	19,5	19,2	20,1	20,3	20	19,3	18,9	18,6
12:00	30,9	30,8	30,7	30,6	30,9	30,2	41,4	40,9	40,5	41,2	41,2	29,8	40,9	31	30,5	30,7	40,4	39,9
15:00	43,7	43,8	44,5	42,6	42,4	42,6	49,2	48,8	49,2	49,1	49,3	49,7	51	51	50,9	48,7	47	47,3
18:00	43,4	43,6	44,3	511	42,3	42,4	50,2	50	50,3	50,3	50,6	51,1	53,2	53,3	53,2	50,1	48,7	49
21:00	28,	29	29	36,7	37,5	36,9	35,6	35,6	35,3	31,9	32,1	31,9	38,2	38,5	37,9	36	35,7	35,4

No receptor R1, o índice PET aumentou gradualmente de 20,5ºC (cenário 1A), 20,9ºC (cenário 2A) e 20,9ºC (cenário 3A) às 06:00h para 43,4ºC (cenário 1A), 43,6ºC (cenário 2A) e 44,3ºC (cenário 3A) às 18:00h, evidenciando um aumento do estresse térmico ao longo do dia. O pico mais alto foi registrado às 15:00h, quando o índice PET atingiu 43,7ºC (cenário 1A), 43,8ºC (cenário 2A) e 44,3ºC (cenário 3A), indicando uma sensação de "muito quente". No receptor R2, observou-se um aumento do índice PET ao longo do dia, com os valores mais altos medidos às 18:00h, também indicando uma sensação de "muito quente". Os valores mais baixos foram registrados às 06:00h em todos os cenários, criando uma sensação de "confortável".

Para o receptor R3, o índice PET geralmente foi menor em comparação ao receptor R2 nos mesmos horários do dia e cenários. O índice foi maior às 18:00h, também ocasionando a sensação de "muito quente", em todos os três cenários para o receptor R3, semelhante ao observado para o receptor R2. Os valores mais baixos ocorreram novamente às 06:00h e 09:00h, criando uma sensação de "confortável", porém os valores foram ligeiramente inferiores para o receptor R3 em comparação ao receptor R2. Para o receptor R4, observou-se um comportamento semelhante ao receptor R2, com valores mais elevados às 18:00h, ocasionando a sensação de "muito quente", e valores mais baixos registrados às 06:00h e 09:00h, criando uma sensação de "confortável". No entanto, houve algumas variações entre os diferentes cenários.

No receptor R5, no cenário 1A, o índice PET apresentou um comportamento similar ao receptor R4, com valores elevados durante o dia, especialmente nos picos de temperatura às 15:00h e 18:00h, criando a sensação de "muito quente". No cenário 2A, os valores foram semelhantes para os quatro receptores anteriores em todos os horários, exceto às 18:00h, quando o receptor R5 apresentou valores mais elevados, também criando a sensação de "muito quente". Os valores de índice PET nos demais receptores foram menores em comparação ao receptor R6. No cenário 1A, os valores foram relativamente confortáveis apenas nos horários de 06:00h e 09:00h, enquanto nos demais horários houve sensação de desconforto térmico. No cenário 2A e cenário 3A, o desconforto foi semelhante ao cenário 1A, porém menos intenso, especialmente nos horários mais quentes do dia, às 15:00h e 18:00h, suscitando a sensação de "muito quente".

5. CONCLUSÕES

As variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e TRM) e o conforto térmico (índice PET) foram investigados através de cenários simulados, o que possibilitou a observação do comportamento dessas variáveis em relação à verticalização do microclima e ao conforto térmico. Os resultados indicaram variações na temperatura ao longo do dia, com o valor máximo registrado no final da tarde, alcançando 30,73ºC (cenário 3A/R5), e o mínimo registrado em 24,58ºC (cenário 3A/R2), os valores mais baixos foram às 08:00h. A variação em cada receptor e cenário foi de aproximadamente 4,9ºC, indicando que o processo de verticalização não influenciou significativamente. Em relação à velocidade do ar, foram observados valores máximos ou mínimos dependendo da localização do receptor, levando em consideração a verticalização dos edifícios e sua orientação em relação à ventilação predominante (sudeste) na cidade.

Cada receptor apresentou um comportamento específico em relação à umidade, com variações distintas em diferentes momentos. De maneira geral, os níveis de umidade foram mais altos pela manhã, alcançando 76,42% (cenário 3A/R2), e diminuíram ao longo do dia, atingindo valores mais baixos no final da tarde, com 51% (cenário 2A/R3). Essas informações podem ser úteis para compreender a dinâmica em diferentes ambientes e auxiliar na tomada de decisões. Em relação à TRM, os dados mostraram variações similares nos cenários, com um aumento a partir das 11:00h e um aumento representativo entre 17:00h e 18:00h (69,73ºC,

cenário 1A/R5), seguido de uma queda às 08:00h (15,94ºC, cenário 3A/R4). Os cenários 1A e 2A apresentaram TRM mais elevadas, enquanto o cenário 3A apresentou uma TRM menor, além de uma variação menor.

Algumas limitações desta pesquisa devem ser destacadas, como a alta demanda computacional e o tempo necessário para os cálculos de simulação. No entanto, os resultados obtidos enfatizam a importância de considerar o conforto térmico no planejamento urbano, implementando estratégias para mitigar o calor e melhorar o conforto. A análise do índice PET fornece informações valiosas sobre as variações térmicas ao longo do dia e em diferentes áreas, permitindo a identificação de áreas com maior risco de desconforto térmico.

Ao projetar o ambiente construído, é crucial considerar medidas como a seleção adequada de materiais de construção, o planejamento de áreas verdes e a criação de sombreamento, com o intuito de promover condições mais confortáveis. Além disso, é necessário levar em consideração fatores como a ventilação e a orientação dos edifícios. É fundamental destacar que as conclusões deste estudo são limitadas à área analisada e aos cenários simulados. Outros elementos, como a localização geográfica, a presença de vegetação e a densidade urbana, podem exercer uma influência térmica e devem ser abordados em estudos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOELATA, Amir. Reducing outdoor air temperature, improving thermal comfort, and saving buildings' cooling energy demand in arid cities – Cool paving utilization. **Sustainable Cities and Society**, [*s. l.*], v. 68, n. 102762, p. 17, 2021.

ACERO, Juan A. *et al.* Clustering weather types for urban outdoor thermal comfort evaluation in a tropical area. **Theoretical and Applied Climatology**, [*s. l.*], v. 139, n. 1–2, p. 659–675, 2020.

ALTUNKASA, Ceren; USLU, Cengiz. Use of outdoor microclimate simulation maps for a planting design to improve thermal comfort. **Sustainable Cities and Society**, [*s. l.*], v. 57, n. 102137, p. 11, 2020.

APREDA, Carmela; REDER, Alfredo; MERCOGLIANO, Paola. Urban morphology parameterization for assessing the effects of housing blocks layouts on air temperature in the Euro-Mediterranean context. **Energy and Buildings**, [*s. l.*], v. 223, n. 110171, p. 20, 2020.

BRUSE, Michael; FLEER, Heribert. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling & Software**, [*s. l.*], v. 13, n. 3–4, p. 373–384, 1998.

CAMPOS, Maíra Ribeiro. **O Uso Do Envi-Met Na Análise Microclimática Urbana : a Praça Afonso Pena – Tijuca , Rj**. 2018. 155 f. - Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura r Urbanismo, UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

GUSSON, Carolina dos Santos. **O impacto da verticalização no microclima urbano e no conforto térmico na escala do pedestre : o papel da geometria e da envoltória dos edifícios**. 2020. 268 f. - Universidade de São Paulo, [*s. l.*], 2020.

HAMI, Ahmad *et al.* **Assessing the thermal comfort effects of green spaces: A systematic review of methods, parameters, and plants' attributes**. [*S. l.: s. n.*], 2019.

LEAL, Limber Patric Santos; BARBOSA, Ricardo Victor Rodrigues. Conforto térmico em cânions urbanos verticalizados de cidade litorânea em clima tropical quente e úmido. **XIX Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído**, [*s. l.*], v. 19, p. 1–11, 2022.

LIU, Zhixin; ZHENG, Senlin; ZHAO, Lihua. Evaluation of the ENVI-met vegetation model of four common tree species in a subtropical hot-humid area. **Atmosphere**, [*s. l.*], v. 9, n. 5, 2018.

RAMYAR, Reza *et al.* Exploring reconfiguration scenarios of high-density urban neighborhoods on urban temperature–The case of Tehran (Iran). **Urban Forestry and Urban Greening**, [*s. l.*], v. 44, n. 1618–8667, p. 126398, 2019.

SHINZATO, Paula. **Impacto da vegetação nos microclimas urbanos em função das interações solo-vegetação-atmosfera**. 2014. 205 f. [*s. l.*], 2014.

SILVA, Ivanize Claudia dos Santos e. **Índice ambiental urbano (IAU): uma contribuição ao estudo do planejamento e do conforto térmico em espaços abertos.** 2017. 239 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [*s. l.*], 2017.

_____, Caio Frederico e. **O conforto térmico de cavidades urbanas : contexto climático do Distrito Federal**. 2013. 175 f. - Tese de Doutorado, Faculdade de Arquitetura r Urbanismo, UNB, Brasília, 2013.

_____, Geovany J. A. da; ROMERO, Marta A. B. Urbanismo sustentável no Brasil e a construção de cidades para o novo milênio. **8º Seminário Internacional NUTAU 2010, Design e Inovação,**[*s. l.*], p. 11, 2010.

SIMON, Helge; SINSEL, Tim; BRUSE, Michael. Introduction of fractal-based tree digitalization and accurate in-canopy radiation transfer modelling to the microclimate model ENVI-met. **Forests**, [*s. l.*], v. 11, p. 869, 2020.

SOUZA, Vladimir S. de *et al.* Calibração De Mapa Climático Urbano Da Cidade De João Pessoa / Pb Apoiada Por Simulação Computacional. *In*: , 2019, João Pessoa, Paraiba - Brasil. **XV ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. XI ELACAC - Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído**. João Pessoa, Paraiba - Brasil: [*s. n.*], 2019. p. 10.

SU, Xiaochao *et al.* Optimization Design of Underground Space Overburden Thickness in a Residential Area Concerning Outdoor Thermal Environment Evaluation. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 10, p. 3205, 2018..

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**, [*s. l.*], v. 43, , p. 55–76, 2018.

WERNECK, Daniela Rocha. **Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas: estudo de caso em áreas comerciais em Brasília - DF.** 134 f. - Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura r Urbanismo, UNB, Brasília, 2018.

YUAN, Yao *et al.* Seasonal Variations of the Urban Thermal Environment Effect in a Tropical Coastal City. **Advances in Meteorology**, [*s. l.*], v. 2017, p. 18, 2017.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à capes pela concessão de bolsa de mestrado 2022-2023.