paranoá ARTIGO ORIGINAL
TECNOLOGIA, AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE
2025
v.18, e54530

Efeito da vegetação no microclima urbano: estudo de caso no Rio de Janeiro com uso de simulações no ENVI-met

Effect of vegetation on the urban microclimate: a case study in Rio de Janeiro using ENVI-met simulations

Efecto de la vegetación en el microclima urbano: estudio de caso en Río de Janeiro con simulaciones en ENVI-met

Marco Antonio M. Almeida*
Universidade Federal Fluminense; Faculdade de Arquitetura e Urbanismo; Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.
Niterói (RJ), Brasil
professormilazzo@gmail.com

Louise Land B. Lomardo
Universidade Federal Fluminense; Faculdade de Arquitetura e Urbanismo; Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.
Niterói (RJ), Brasil

* Autor correspondente.

CRediT

Contribuição de autoria: Concepção; Curadoria de dados; Análise; Coleta de dados; Metodologia; Software; Supervisão; Validação; Visualização; Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição: ALMEIDA, M. A. M.; Supervisão; Validação; Visualização; Redação – revisão e edição: LOMARDO, L. L. B.;

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não há conflito de interesse.

Financiamento: Programa de Excelência Acadêmica (PROEX); Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); Programa de Desenvolvimento de Pesquisa Aplicada da Prefeitura de Niterói (PDPA).

Aprovação de ética: Os autores certificam que não houve necessidade de aprovação de Comitê de Ética.

Uso de I.A.: Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho.

Editores responsáveis: Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Livia Santana (Editora Associada); Joara Cronemberger (Editora Associada); Vanda Alice Garcia Zanoni (Editora Associada); Wanessa Rodrigues de Souza (Assistente editorial).

Artigo licenciado sob uma Licença Creative Commons (CC-BY).
Submetido em: 27 jun. 2024 | Aceito em: 20 dez. 2024.

Resumo

Este artigo tem como objetivo analisar a influência da vegetação em uma rua do Rio de Janeiro, em um bairro consolidado, avaliando o impacto de diferentes cenários na temperatura e umidade relativa do ar, utilizando simulações computacionais com o *software* ENVI-met 5 e a linguagem *Python*. Foram comparados a situação existente da rua no ano de 2018, com sete diferentes cenários hipotéticos, utilizando duas espécies de vegetação arbórea, coberturas e fachadas verdes. Verificou-se que: [1] nas condições climáticas adotadas, as diferenças entre os cenários foram pequenas; [2] a adoção de diferentes espécies arbóreas e a variação da sua quantidade não promoveu resultados médios significativos; [3] a partir das características morfológicas da Rua Fernando Osório, o uso de fachadas verdes obteve as menores temperaturas e as maiores umidades relativas do ar médias e pontuais entre os cenários; [4] para alcançar bons níveis higrotérmicos nas ruas dos centros urbanos consolidados, garantindo a sustentabilidade e eficiência geral do sistema, podem ser adotadas soluções combinadas das diferentes aplicações de vegetação.

Palavras-chave: Microclima Urbano; Temperatura Atmosférica; Conforto Higrotérmico; Vegetação.

Abstract

This article aims to analyze the influence of vegetation on a street in Rio de Janeiro, located in a consolidated neighborhood, by evaluating the impact of different scenarios on air temperature and relative humidity using computational simulations with the ENVI-met 5 software and Python programming language. A comparison was made between the existing situation of the street in 2018 and seven different hypothetical scenarios, using two species of tree vegetation, green roofs, and green facades. It was found that: [1] under the adopted climatic conditions, the differences between the scenarios were small; [2] the adoption of different tree species and the variation in their quantity did not produce significant average results; [3] based on the morphological characteristics of Fernando Osório Street, the scenarios using green facades resulted in achieving both lower average and spot air temperatures, and higher average and spot relative humidities among the other scenarios; [4] to achieve good hygrothermal levels in the streets of consolidated urban centers, ensuring the sustainability and overall efficiency of the system, combined solutions of different vegetation applications can be adopted.

Keywords: Urban Microclimate; Atmospheric Temperature; Hygrothermal Comfort; Vegetation.

Resumen

Este artículo tiene como objetivo analizar la influencia de la vegetación en una calle de Río de Janeiro, ubicada en un barrio consolidado, evaluando el impacto de diferentes escenarios en la temperatura del aire y la humedad relativa mediante simulaciones computacionales con el software ENVI-met 5 y el lenguaje de programación Python. Se comparó la situación existente de la calle en el año 2018 con siete escenarios hipotéticos diferentes, utilizando dos especies de vegetación arbórea, cubiertas y fachadas verdes. Se encontró que: [1] bajo las condiciones climáticas adoptadas, las diferencias entre los escenarios fueron pequeñas; [2] la adopción de diferentes especies arbóreas y la variación de su cantidad no produjo resultados promedio significativos; [3] a partir de las características morfológicas de la calle Fernando Osório, el uso de fachadas verdes obtuvo las temperaturas más bajas y las mayores humedades relativas promedio y puntuales entre los escenarios; [4] para alcanzar buenos niveles higrotérmicos en las calles de los centros urbanos consolidados, garantizando la sostenibilidad y eficiencia general del sistema, se pueden adoptar soluciones combinadas de las diferentes aplicaciones de vegetación.

Palabras clave: Microclima Urbano; Temperatura Atmosférica; Conforto Higrotérmico; Vegetación.

1 Introdução

O planejamento inadequado das cidades promove o crescimento desordenado, a falta de áreas verdes e permeáveis, além do uso de materiais construtivos de alta inércia térmica, alterando a umidade, a temperatura e a circulação do ar. Essas características estão relacionadas ao conforto higrotérmico, à eficiência energética e à qualidade dos espaços urbanos (Lois; Labaki, 2001; Lasmar; Nunes, 2022).

Uma das soluções para melhorar o microclima nas cidades é a introdução de vegetação, seja por meio da inserção de árvores nas ruas, praças, e parques, seja pelo uso de vegetação nas superfícies de fachadas e coberturas das edificações (Gill *et al*., 2007; Mughal *et al*., 2021). Esse efeito ocorre porque a evapotranspiração das plantas aumenta o calor latente e diminui o calor sensível, resfriando as suas folhas e, consequentemente, o ar ao seu redor (Taha *et al*., 1988; Grimmond; Oke, 1991). As plantas também geram sombras, que proporcionam proteção às pessoas e às superfícies contra a radiação solar direta (Oke, 1988). Além disso, a vegetação pode influenciar o movimento do ar e as trocas de calor (Bonan, 1997).

No entanto, as diferentes tipologias urbanas definem as possibilidades de aplicação da vegetação. Em muitas áreas de grandes cidades, essas possibilidades são bastante limitadas. Bairros antigos, como o Flamengo, no Rio de Janeiro, com calçadas estreitas e edificações sem afastamentos, são ainda mais prejudicados pelo alargamento das vias para atender à demanda do transporte rodoviário. As áreas livres nos centros urbanos consolidados são escassas ou subaproveitadas, além de possuírem alto valor econômico, dificultando a implementação de novas áreas arborizadas. (Mathieu *et al*., 2007).

Uma alternativa para as cidades pode ser a implantação de áreas com vegetação nas coberturas e fachadas das edificações, as quais ainda apresentariam outras vantagens, como, por exemplo, a melhoria do isolamento térmico da envoltória (Akbari, 2005; Levinson *et al*., 2005; Gaitani *et al*., 2007; Theodosiou, 2009; Sfakianaki *et al*., 2009; Bozonnet *et al*., 2011).

Dentre as possibilidades de análise da influência da vegetação no clima urbano, as simulações computacionais podem ser utilizadas para prever situações futuras ou avaliar o resultado de cenários projetados com diferentes elementos morfológicos. O *software* ENVI-met utiliza modelos tridimensionais para analisar as interações térmicas em microescala em ambientes urbanos. Esse *software* incorpora cálculos de dinâmica dos fluidos (CFD) para avaliar parâmetros como fluxo de ar e turbulência, além de considerar os processos termodinâmicos que ocorrem entre todas as superfícies, incluindo a vegetação. Ele também considera todas as categorias de radiação e calcula a média de temperatura radiante (Bruse, 2007).

Diversas simulações têm sido realizadas para analisar o conforto térmico em ambientes externos com o *software* ENVI-met, devido às suas características holísticas, que permitem interpretar com maior precisão a complexidade dos fenômenos climáticos (Emmanuel *et al*. 2007; Peng; Jim, 2013; Carfan; Galvani; Nery 2012). Na análise do efeito da vegetação nos ambientes urbanos, Xiao *et al*. (2023) realizaram simulações na vila histórica de Shimengao, em Chizhou, na China, com ganhos significativos de conforto térmico ao nível da rua, com a implantação de pequenos canteiros com vegetação, sem

impactar na paisagem da vila. Nas simulações realizadas por Wang *et al*. (2023), foi verificado que o efeito do resfriamento das árvores aumenta proporcionalmente à quantidade de espécies, porém até um determinado limite, que depende das características do clima e da forma urbana. O estudo também determinou que uma maior quantidade de árvores de pequeno porte é mais eficiente do que poucas árvores de grande porte.

A pesquisa de Barros *et al*. (2016) utilizou de medições em campo e de simulações computacionais com o ENVI-met 4.0 para analisar diferentes cenários em duas ruas de Maceió, Alagoas. Foram simulados um cenário sem vegetação, um segundo cenário com as árvores existentes (14 espécies) e um terceiro cenário com o máximo potencial de arborização possível na rua (30 espécies). Os resultados apresentaram uma diferença média de 2,0 ºC, entre os cenários 1 e 2 simulados pelos autores, porém não houve uma diminuição significativa na temperatura do ar na simulação do terceiro cenário.

A versão 5 do *software* ENVI-met, lançada em 2022, incorpora dois avanços em relação às versões anteriores. O primeiro avanço é a modelagem mais realista das espécies vegetais, com o uso do sistema Lindenmayer [1], essencial para uma simulação precisa da sua influência no ambiente urbano. Nas versões anteriores, o ENVI-met suportava apenas o uso de plantas simplificadas, como gramíneas e plantas tridimensionais genéricas, representando diferentes formatos de árvores. O novo modelo MiPSS (Microscale Plant Simulation System) analisa os elementos das árvores com um nível de alta resolução, possibilitando definir espécies específicas e modelar suas propriedades em relação à proteção contra o vento, proteção solar e transpiração.

O segundo avanço é o desenvolvimento do algoritmo Indexed View Sphere (IVS), que utiliza o rastreamento por raios para escanear o ambiente e simular a troca de radiação entre as diferentes estruturas do ambiente. As versões anteriores usavam um sistema simplificado para simular a distribuição da radiação direta e difusa.

Uma revisão da literatura indica serem necessárias estratégias mais adequadas para a modelagem da vegetação utilizando o *software* ENVI-met, especialmente com os novos algoritmos da versão 5. Os dados utilizados nesses estudos eram simplificados, compatíveis com as exigências das versões anteriores, baseados em medições em campo ou em referências bibliográficas limitadas. Além disso, as pesquisas desenvolvidas nas versões anteriores do *software* apresentavam resultados menos precisos, que agora precisam ser atualizados (Liu *et al*., 2023).

Apesar do ENVI-met apresentar uma série de vantagens em relação a outros sistemas para a análise do clima urbano, ainda existem problemas que necessitam de ajustes, como a interface do usuário, o tempo de processamento e a documentação do *software*. Assim, para a comparação de diferentes cenários, foi necessário um processamento adicional com o uso da linguagem de programação *Python*. O *Python* é conhecido por sua facilidade de uso e legibilidade, tornando-se uma linguagem popular para trabalhos científicos e ciência de dados, contando com um amplo ecossistema de bibliotecas (Oliphant, 2007) que permite a leitura direta dos arquivos gerados pelas simulações do ENVI-met.

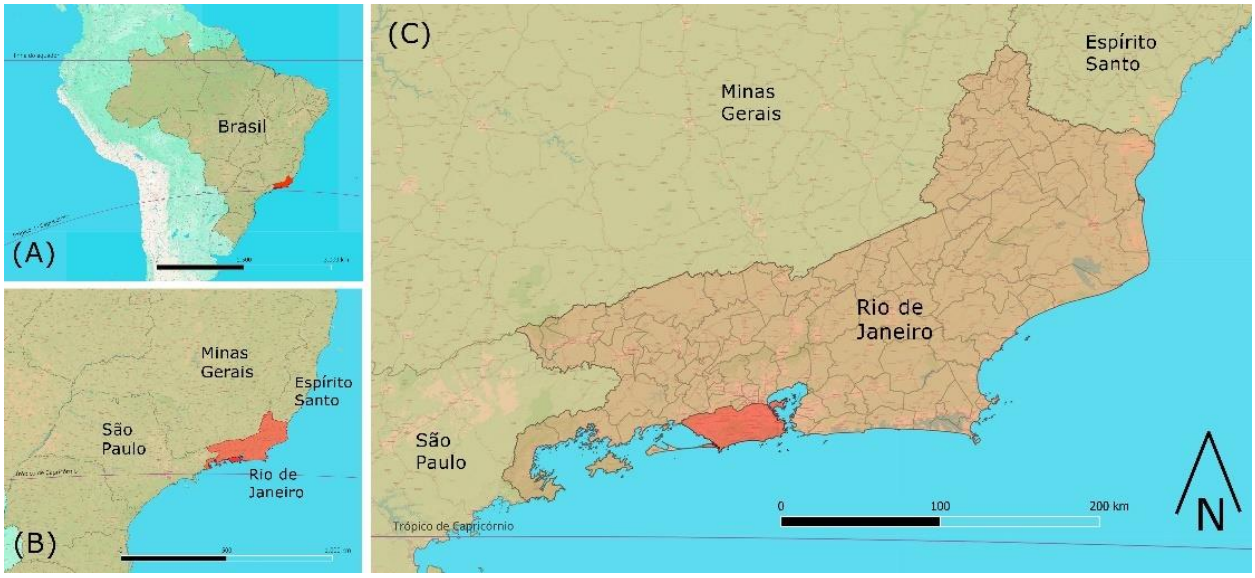
[1] Criados em 1968 por Aristid Lindenmayer, os sistemas utilizam regras de substituição de palavras por elementos geométricos que permitem o desenvolvimento computacional de estruturas ramificadas realistas encontradas na natureza.

Portanto, o presente estudo objetiva analisar a influência da vegetação em uma rua do Rio de Janeiro, em um bairro consolidado, avaliando o impacto de diferentes cenários na temperatura e umidade relativa do ar, utilizando simulações computacionais com o *software* ENVI-met 5 e a linguagem *Python*.

2 Área de Estudo

Para a presente pesquisa foi selecionada a Rua Fernando Osório, no Bairro do Flamengo, Rio de Janeiro. A Cidade do Rio de Janeiro é a Capital do Estado, e está situada a 22º54'23" de latitude sul e 43º10'21" de longitude oeste apresentando área de 1.200 km^2 e 6.211.223 habitantes (IBGE, 2022). Segundo a classificação Köppen, a Cidade do Rio de Janeiro (Figura 1) se classifica predominantemente no clima de monção (Am), com temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18ºC, com uma estação seca de pequena duração compensada pelos totais elevados de precipitação (Alvares *et al*. 2013).

Figura 1: Mapa com a localização da cidade do Rio de Janeiro na Unidade Federativa (C), da Unidade Federativa no Brasil (B) e do Brasil no continente sul-americano (A).

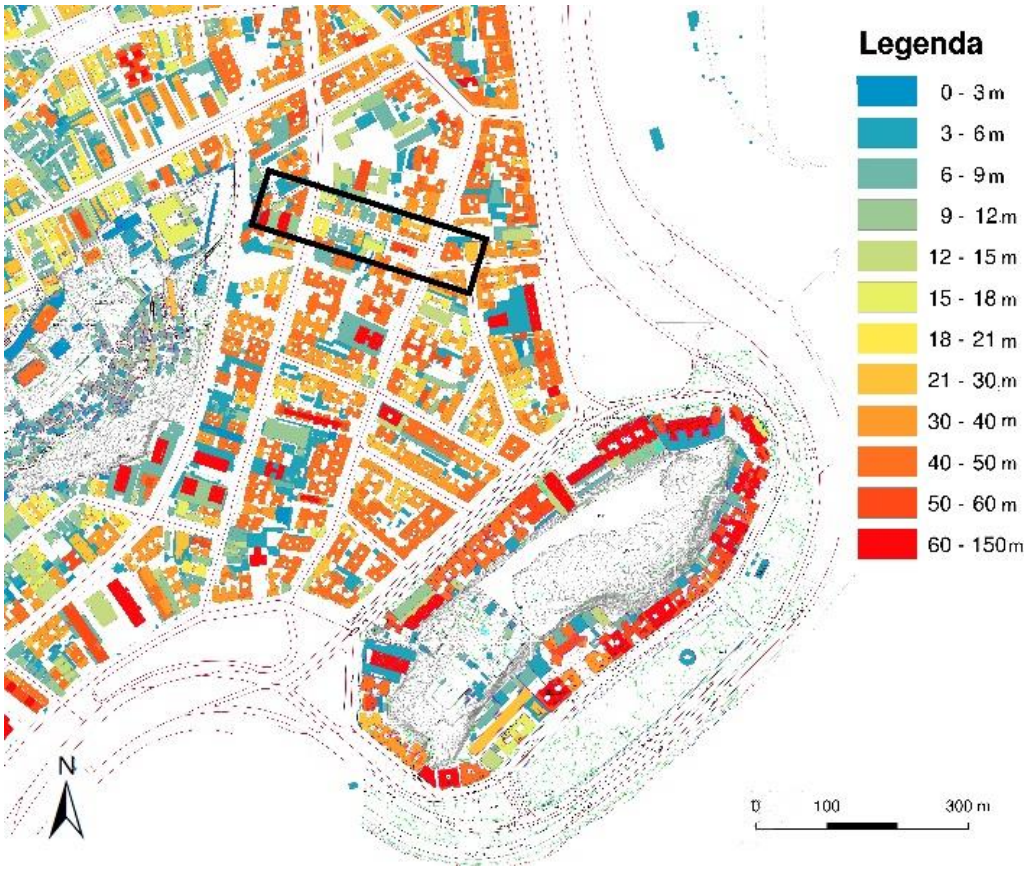


O bairro do Flamengo é um dos bairros mais antigos da cidade, com uma malha consolidada e predominância de construções residenciais de diferentes épocas, e consequentemente regidas por diferentes legislações. Ele está localizado na zona sul da cidade, na entrada da Baia de Guanabara, próximo do centro e do Parque do Flamengo (Figura 2).

O bairro do Flamengo apresenta características heterogêneas, porém, por meio de levantamentos feitos no local e imagens aerofotométricas, foi identificado que a sua maior parte possui albedo entre 0,10 e 0,20, percentual de áreas construídas entre 40% e 60%, percentual de áreas permeáveis menor que 10%, índice relação de *canyon* urbano maior que 2, rugosidade maior que 25 m, e fator de visão de céu entre 0,2 e 0,4. A partir desses dados, utilizando a classificação desenvolvida por Stewart e Oke (2012), a presente pesquisa classificou o bairro do Flamengo como pertencente à Zona LCZ1. Na figura 3 são indicadas as alturas das edificações de parte do bairro do Flamengo com a marcação da área da rua selecionada para o caso de estudo.

Figura 2: Mapa do Rio de Janeiro com a delimitação do bairro do Flamengo.

Figura 3: Mapa com indicação das alturas das edificações (metros) em parte do bairro do Flamengo e marcação da Rua Fernando Osório.

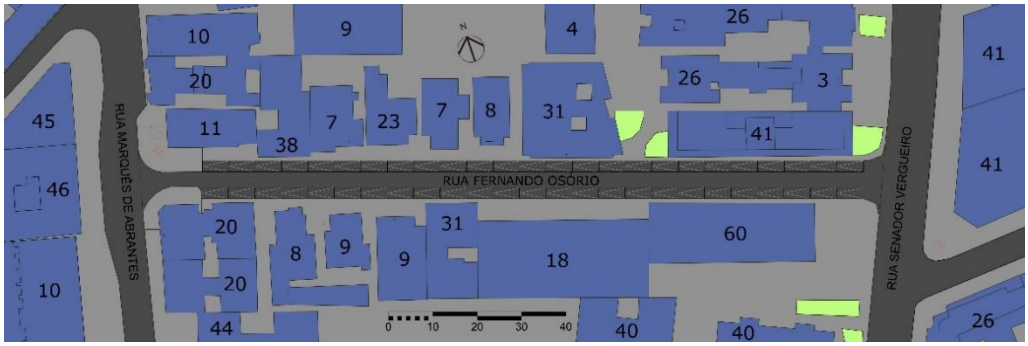


As simulações da presente pesquisa foram realizadas em toda a extensão da Rua Fernando Osório, limitada a leste pela Rua Senador Vergueiro e a oeste pela Rua Marquês de Abrantes, com edificações de diferentes características, alturas e nenhuma arborização (Figura 4).

Figura 4: Foto da Rua Fernando Osório a partir da esquina com a Rua Marquês de Abrantes.

A rua está orientada no sentido sudeste-noroeste, com uma angulação de 8º em relação à orientação norte, e possui comprimento total de 186 metros. A planta da Rua Fernando Osório e do seu entorno, com a respectiva altura de cada prédio, está apresentada na Figura 5. A presença dos morros e do sentido nordeste-sudoeste das ruas do bairro redireciona e reduz o fluxo dos ventos vindos do mar.

Figura 5: Mapa da Rua Fernando Osório com a indicação da altura de cada prédio (metros).



A área asfaltada para automóveis na rua apresenta 8,5 m de largura, com passagem para um único carro e área destinada a estacionamento nas duas laterais. As calçadas possuem aproximadamente 1,50 m de largura, além da presença de postes e fiação elétrica aérea, sendo muito difícil a implantação de canteiros com novas árvores.

3 Métodos

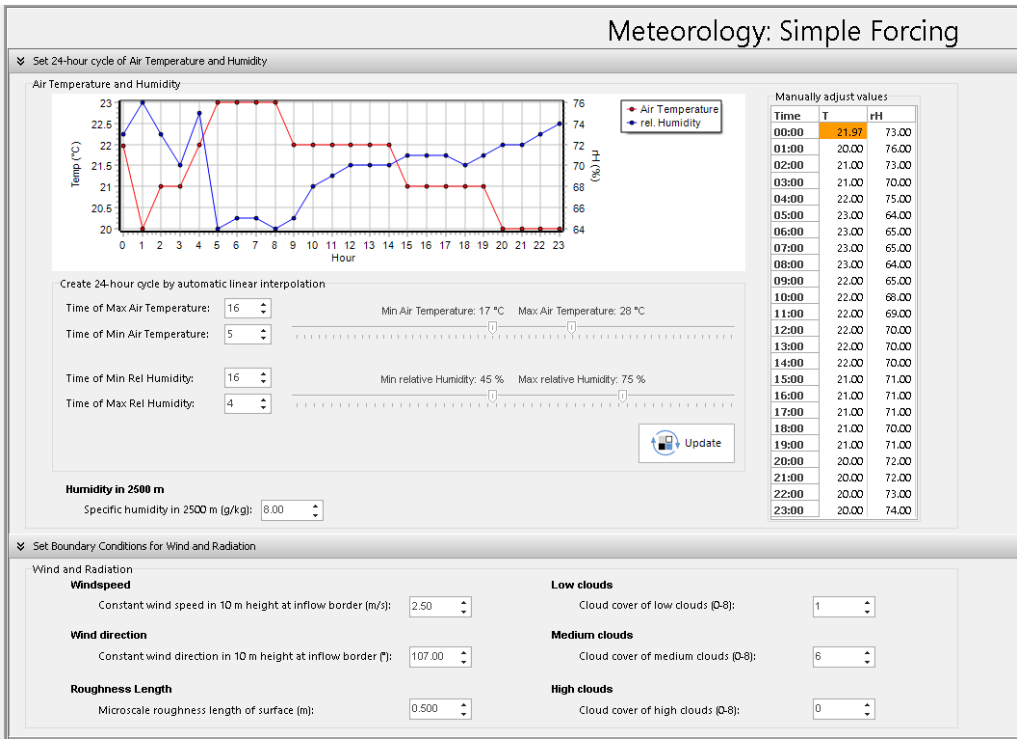
3.1 Variáveis Climáticas

O período de simulação adotado foi de 48 horas, com início em 10 de setembro de 2018 para estabilização, e término em 11 de setembro de 2018, de onde foram extraídos os dados analisados. Durante o inverno, com a inclinação mais baixa do sol, há maior acesso da radiação solar, apesar da sua menor intensidade. A pesquisa também será estendida futuramente com medições e simulações em outros meses, para a realização de uma comparação ao longo do ano.

Para a configuração das condições meteorológicas do contorno da área simulada, foram utilizados os dados de temperatura e umidade relativa do ar obtidos por um Datalogger instalado na Rua Senador Vergueiro, que registrou os dados a cada 10 minutos. O modelo do *datalogger* utilizado foi o GM1365 de fabricação da Benetech, calibrado de fábrica, com caixa de proteção e ventilação forçada. O Aparelho da Benetech apresenta precisão de 0,2 ^{0}C e constante de tempo variando de 5 a 30 segundos, e apresenta precisão de 2 % na medição da umidade relativa, com constante de tempo de 8 segundos.

Para a velocidade e direção do vento, foram utilizados os dados da Estação Meteorológica do Aeroporto Santos Dumont, corrigidos pelo *software* Autodesk CFD, com um modelo tridimensional de toda a área de Botafogo até o aeroporto, resultando em um valor médio de 1,5 m/s no sentido leste-oeste da rua. Os dados de nebulosidade, necessários para o modelo, foram obtidos a partir do site da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET). Os dados foram utilizados na configuração Simple Forcing do ENVI-met e estão apresentados na Figura 6.

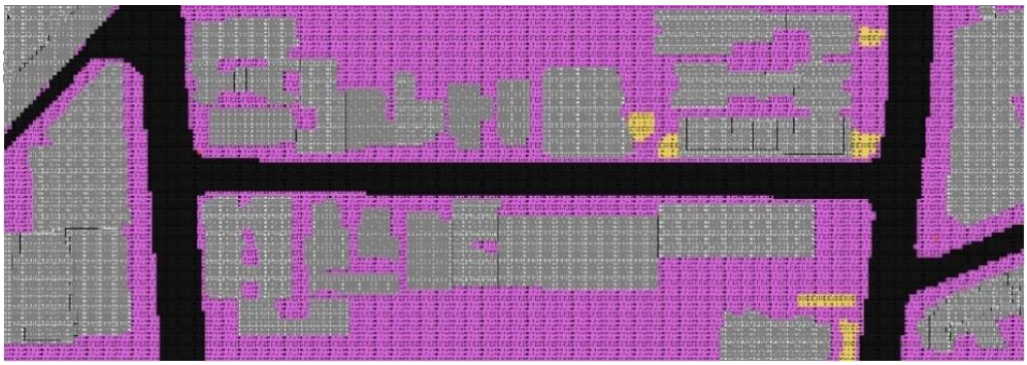
Figura 6: Tela de configuração dos dados climáticos do *software* ENVI-met no modo Simple Force.



3.2 Modelagem

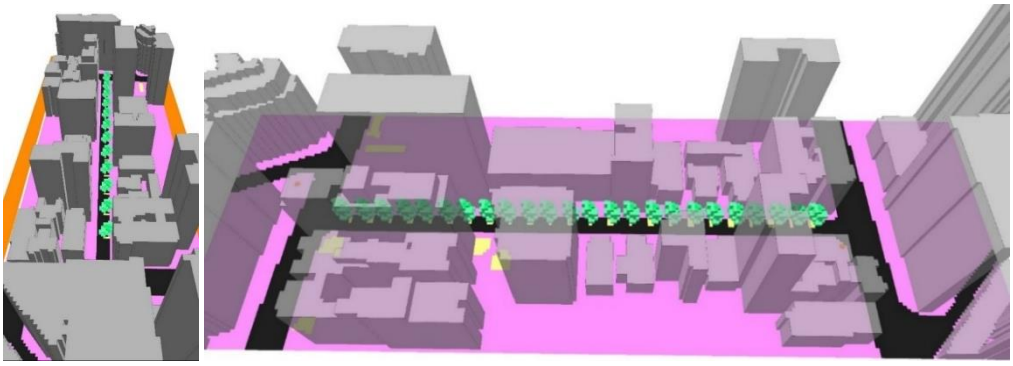
Para a realização das simulações foram modelados o cenário com a configuração urbana existente da Rua Fernando Osório (Figura 7) e outros 7 cenários com diferentes configurações de quantidade e tipos de suporte para a vegetação.

Figura 7: Planta baixa da Modelagem do Cenário 1 – Situação Existente da Rua Fernando Osório no *software* ENVI-met.



Para os projetos dos cenários com a implantação de árvores, a faixa asfaltada, com largura média de 8,20 m, foi reduzida para 6,10 m, eliminando a possibilidade de estacionamento de veículos em um dos lados da via. Dessa forma, foi possível ampliar ambas as calçadas em cerca de 1 m, melhorando a acessibilidade na rua. Nos projetos com 12 árvores (cenários 4, 5, 6 e 8) foram criados canteiros sobre a faixa de asfalto, intercalados com duas vagas para automóveis. No projeto com a implantação de 24 árvores (cenário 7), os canteiros sobre a faixa de asfalto foram intercalados com uma única vaga para automóvel (Figura 8).

Figura 8: Representação em perspectiva no módulo Spaces do ENVI-met do cenário 7.



Para as simulações deste estudo, duas espécies arbóreas foram modeladas no módulo *Albero*: a Escumilha (*Lagerstroemia speciosa*) utilizada nos cenários 4, 5, 6 e 8, e o Catiguá (*Trichilia hirta*) utilizada no cenário 7. A Escumilha é uma árvore de pequeno porte, modelada com 10 metros de altura, copa com 4 metros de diâmetro e com Índice de Área Foliar (IAF) de 2,0 m^2/m^2, muito utilizada na arborização das calçadas no Rio de Janeiro (García, 2010; Das, 2014). O Catinguá, por sua vez, é uma árvore nativa de médio porte, modelada com 18 metros de altura, copa com 11 metros de diâmetro e com Índice de Área Foliar (IAF) de 3,5 m^2/m^2. É uma árvore indicada pela prefeitura do Rio para plantio em bosques e praças, mas também comum nas ruas do bairro do Flamengo (Lorenzi, 1992; Febles, 1997; Rio de Janeiro, 2015). Os parâmetros utilizados para configurar as espécies vegetais foram ajustados considerando as deformações observadas em campo, devido às limitações urbanas e às podas realizadas pela prefeitura.

Os materiais das edificações, das pavimentações e as espécies de vegetação utilizadas nas coberturas e fachadas vegetadas foram selecionados a partir da biblioteca do próprio ENVI-met (Tabela 1). Foi realizado um levantamento das áreas de fachadas e coberturas disponíveis em cada edificação para a implantação de vegetação nos cenários simulados, bem como dos materiais das superfícies. Aproximadamente 70% da superfície das envoltórias das edificações foi coberta com vegetação nos cenários 3 e 6.

Tabela 1: Materiais utilizados nas modelagens para simulação com ENVI-met.

	Composição ENVI-met
Alvenarias	000000 Default Wall – moderate insulation
Janelas	0200G4 Clear Float Glass
Coberturas	000000 Default Wall – moderate insulation
Calçadas	0200BA Basalt Brick Road
Asfalto	0200ST Asphalt Road
Canteiros	0200SD Sandy Soil
Vegetação Fachadas	02NAFG Only green
Vegetação Coberturas	02AGDS green + sandy subtrate

Para simular adequadamente a influência dos diversos elementos urbanos na microescala, foi adotado no ENVI-met uma resolução de *grid* de 1 m x 1 m no módulo *spaces* do *software*. O modelo foi dimensionado com 248 m x 86 m, mais um acréscimo de 10 m vazios ao seu redor, sem o uso de *nesting grids*, totalizando um grid de 268 x 106 células. Para a distribuição vertical, foram configuradas 62 células, com a opção de divisão inicial do *grid* em 5 partes, e a opção *telescoping* com fator de 10% com início na altura de 30 m, totalizando 240 m. Nas duas extremidades da Rua Fernando Osório, foram inseridos pontos de receptores, que geram planilhas com os elementos climáticos a cada 10 minutos, para realização da calibração do modelo.

3.3 Calibração

Para calibrar as simulações do ENVI-met, foram realizadas medições em campo utilizando dois termo-higrômetros, posicionados nas mesmas localizações dos receptores do modelo do ENVI-met, seguindo os procedimentos adaptados de Shinzato (2014), Gusson e Duarte (2016) e Shinzato et al. (2018).

Os termo-higrômetros utilizados foram do modelo ITHT 2210, da Instrutemp, calibrados pela própria fabricante. Esses aparelhos possuem uma constante de tempo para as medições de temperatura do ar variando entre 5 e 30 segundos, e constante de tempo de 4 segundos para as medições de umidade relativa do ar. A precisão dos dispositivos é de ± 0,5 ºC para a temperatura do ar e de ±4.5% para a umidade relativa do ar.

Devido às limitações dos equipamentos e à dificuldade de realizar medições no ambiente urbano com alta densidade, a calibração foi feita somente para a temperatura e umidade relativa. A diferença máxima, o erro quadrático médio (MSE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e a diferença média entre as medições de campo e as simulações estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da comparação entre medições em campo e simulações do cenário existente para a temperatura e umidade relativa do ar.

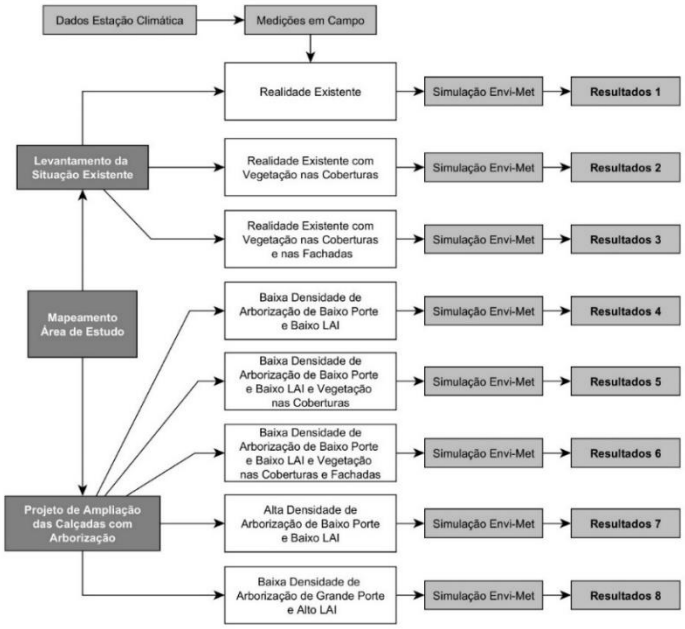
	Receptor 1	**Receptor 2**
Diferença Máxima	2.0 ºC / 7%	2.2 ºC / 9%
MSE	1.2 ºC / 3%	1.7 ºC / 6%
RMSE	1.4 ºC / 4%	1.8 ºC / 7%
Diferença Média	1.0 ºC / 3%	1.6 ºC / 5%

As diferenças encontradas nas calibrações foram superiores às observadas por Shinzato (2014), Gusson e Duarte (2016) e Wang et al. (2023), mesmo considerando as condições climáticas com baixa variabilidade do dia selecionado. No entanto, essas diferenças não invalidam os resultados obtidos na análise da influência da vegetação por meio do uso do ENVI-met, nas condições existentes, uma vez que a pesquisa foca na análise relativa entre os diferentes cenários simulados (Liu et al., 2023; Bao et al., 2023).

3.4 Simulação

Os resultados encontrados na simulação inicial foram utilizados para comparação com as simulações realizadas com os novos cenários propostos conforme fluxograma apresentado na Figura 9.

Figura 9: Fluxograma dos cenários simulados no *software* ENVI-met.



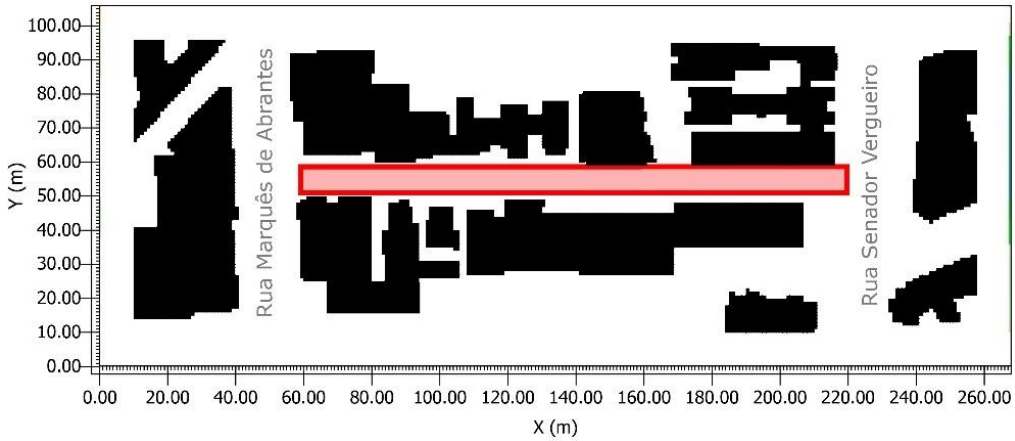
Após o término das simulações, gráficos e mapas de temperatura e umidade relativa do ar foram elaborados no módulo *Leonardo* do ENVI-met, para uma análise preliminar. Esse módulo oferece uma variedade de ferramentas para análise gráfica e em formato de planilhas, porém processa apenas uma simulação por vez e não dispõe de métodos automáticos para a produção de muitos gráficos simultaneamente. Além disso, o Leonardo não permite comparações entre diferentes cenários simulados, apenas entre horários distintos em um mesmo cenário. Por esses motivos, todos os mapas foram gerados utilizando a linguagem de programação *Python* com as bibliotecas *Matplotlib* e *NumPy* (Wales, 2022). Para a elaboração dos gráficos comparativos entre os resultados de diferentes cenários, também foi necessário o uso do *software* Microsoft Excel, agregando as planilhas exportadas do *Leonardo* para cada cenário.

As simulações realizadas no ENVI-met resultam em pares de arquivos: um contendo os metadados que descrevem o conteúdo e o formato dos dados (EDX) e outro com os dados binários dos resultados das simulações (EDT). O arquivo de metadados EDX é baseado no sistema de formato aberto XML semiestruturado, permitindo seu uso por qualquer *software* ou por linguagens de programação, como *Python*, fornecendo os índices necessários para a extração dos dados do arquivo EDT. O uso do *Python* possibilita maior

velocidade e flexibilidade no processamento dos dados, inclusive agregando informações de diferentes simulações, além de oferecer uma ampla gama de bibliotecas para ferramentas gráficas.

Foram calculadas as médias de todos os pontos dentro de uma faixa da Rua Fernando Osório, entre as abscissas 60 m e 220 m e as ordenadas 50 m e 58 m da área simulada, totalizando 1.449 pontos, conforme indicado na Figura 10. Os cálculos foram realizados a partir das planilhas no *Microsoft Excel*, contendo os dados de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do dia 11 de setembro de 2018 para os diferentes cenários.

Figura 10: Planta baixa com indicação da área dos pontos utilizados para o cálculo das médias da temperatura e umidade relativa do ar na Rua Fernando Osório.



A leitura dos resultados das simulações através do *Python* permitiu processar os dados dos elementos climáticos com grande rapidez, gerando 2.352 gráficos, incluindo plantas baixas em diferentes alturas, cortes longitudinais e transversais ao longo da Rua Fernando Osório. Foram identificados os pontos com valores máximos e mínimos, calculadas as médias dos valores de todos os pontos e elaborados os gráficos das variações diárias médias para cada elemento climático.

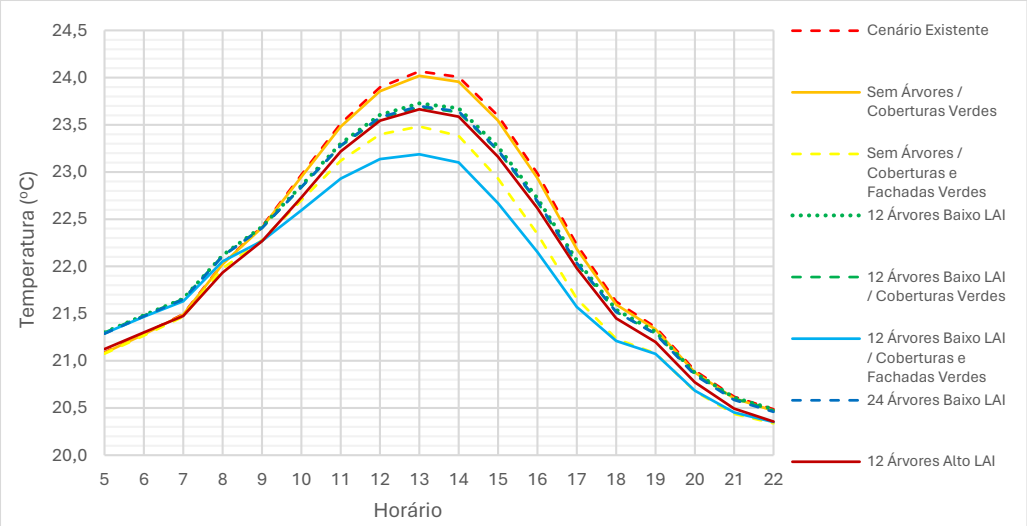
São também apresentados mapas com as diferenças da temperatura do ar e da umidade relativa do ar, entre os cenários existente e os outros 7 cenários propostos, gerados pela linguagem de programação *Python*.

4 Resultados

A Figura 11 apresenta um gráfico com os valores calculados para a temperatura do ar, considerando a média de todos os pontos na área definida na Rua Fernando Osório, na altura de 1,5 metros, para os oito cenários simulados, cobrindo o período das 5 horas às 22 horas do dia 11 de setembro de 2018.

O valor mais alto da temperatura do ar média para todos os cenários foi registrado às 13 horas. A maior diferença média de temperatura calculada foi de -0,9 °C, observada entre o cenário com a situação existente (cenário 1) e o cenário com a implantação conjunta de árvores no nível da rua, coberturas e fachadas verdes (cenário 6), no período entre 13 e 15 horas.

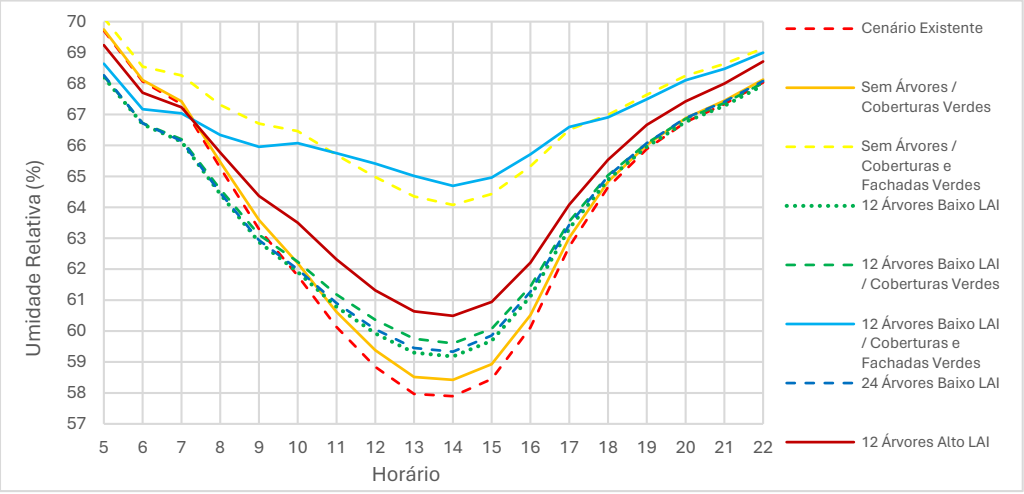
Figura 11: Médias dos valores obtidos para a temperatura do ar (ºC) nas simulações para os diferentes cenários ao longo do dia 11 de setembro de 2018.



A Figura 12 apresenta um gráfico com os valores calculados para a umidade relativa do ar, considerando a média de todos os pontos na área definida na Rua Fernando Osório, à altura de 1,5 metros.

O valor mais baixo da umidade relativa do ar média para todos os cenários foi registrado às 14 horas. A diferença máxima observada foi de 7%, entre o cenário com a situação existente (cenário 1) e o cenário com a implantação conjunta de árvores no nível da rua, coberturas e fachadas verdes (cenário 6), no período entre 13 e 15 horas.

Figura 12: Médias dos valores obtidos para a umidade relativa do ar (ºC) nas simulações para os diferentes cenários ao longo do dia 11 de setembro de 2018.



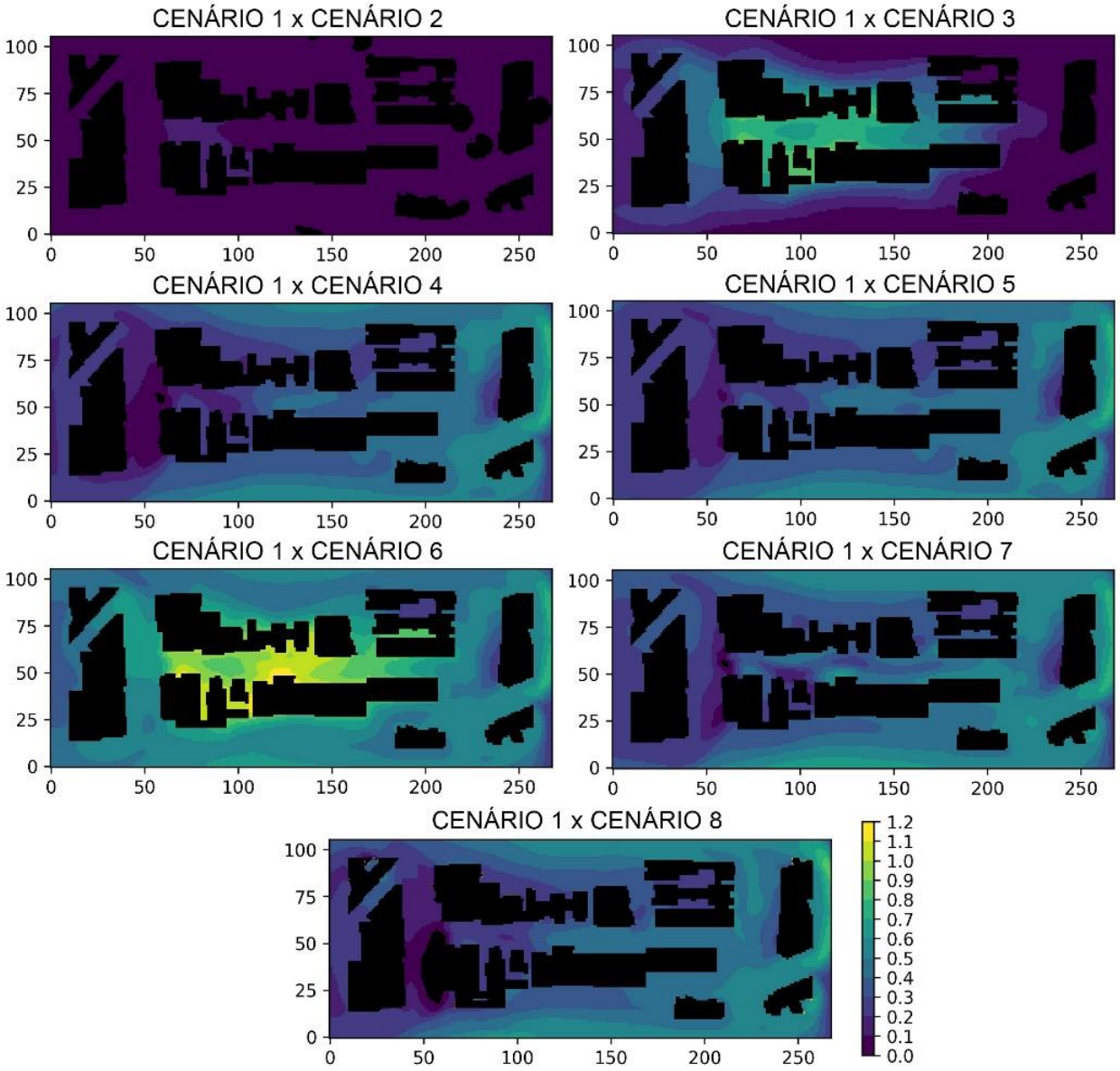
A partir dos gráficos gerados, foi possível verificar que a diferença entre a média da temperatura do ar do cenário inicial e do cenário com a implantação de 12 árvores de pequeno porte e baixo LAI ao longo da rua (cenário 4) foi de -0,3 ºC, enquanto para a umidade relativa do ar foi de 1%. Em comparação com o cenário 7, onde foram implantadas 24 árvores de pequeno porte e baixo LAI, essas diferenças foram de -0,4 ºC para a temperatura do ar e de 1% para a umidade relativa do ar. Já com a implantação de 12 árvores de grande porte e alto LAI, as diferenças foram de -0,4 ºC para a temperatura do ar e 3% para a umidade relativa do ar. O aumento da quantidade de árvores ou a mudança

da espécie não promoveu diferenças significativas, conforme já demonstrado na pesquisa similar de Barros *et al*. (2016).

Além da análise média da temperatura e umidade relativa do ar da Rua Fernando Osório, foram elaborados mapas para uma análise ponto a ponto, a fim de identificar os locais mais afetados pela vegetação. A Figura 13 apresenta plantas baixas na altura de 1,5 metros em relação ao nível do solo, enquanto a Figura 14 exibe cortes longitudinais ao longo do eixo da Rua Fernando Osório, mostrando as diferenças de temperatura do ar (ºC) entre o cenário 1 e os demais cenários, às 13 horas do dia 11 de setembro de 2018.

A maior diferença da temperatura do ar simulada foi de -1,2 ºC, observada entre o cenário inicial (cenário 1) e o cenário com 12 árvores, coberturas e fachadas verdes (cenário 6), nas coordenadas X = 121,5 m e Y = 55,5 m.

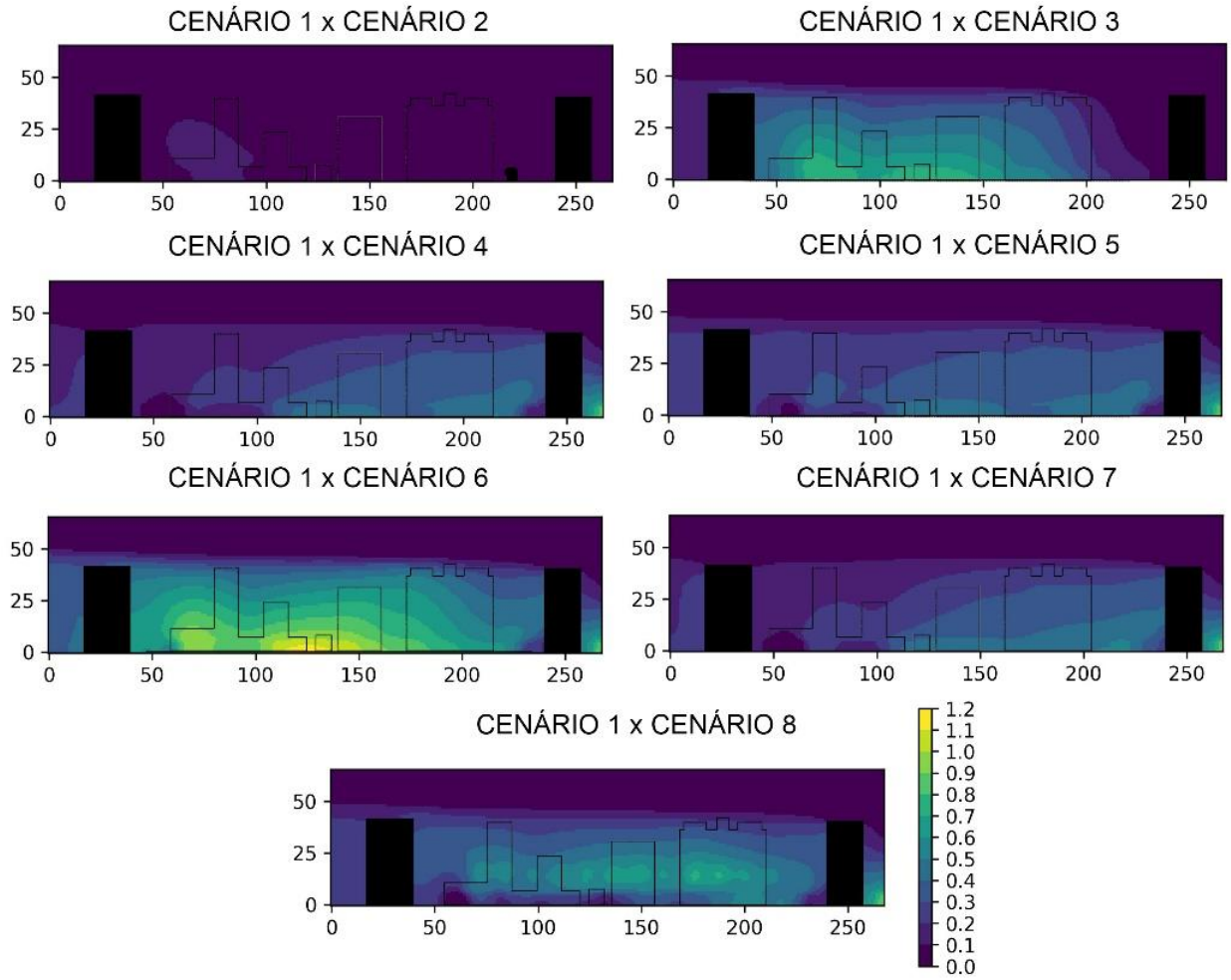
Figura 13: Plantas Baixas da diferença de temperatura do ar (ºC) entre as simulações do cenário 1 e os demais cenários, na altura de 1,5m, no horário de 13:00.



É possível visualizar os efeitos da vegetação na temperatura do ar em diferentes alturas a partir dos cortes no eixo da rua (Figura 14). Os cenários que incluíram vegetação nas fachadas (cenários 3 e 6) apresentaram as maiores reduções médias de temperatura ao longo do eixo da rua, próximas ao nível do solo. A maior diferença pontual da temperatura do ar simulada encontrada entre os cenários 1 e 3 foi de 0,8 °C, e entre os cenários 1 e 6 foi de 1,2 °C.

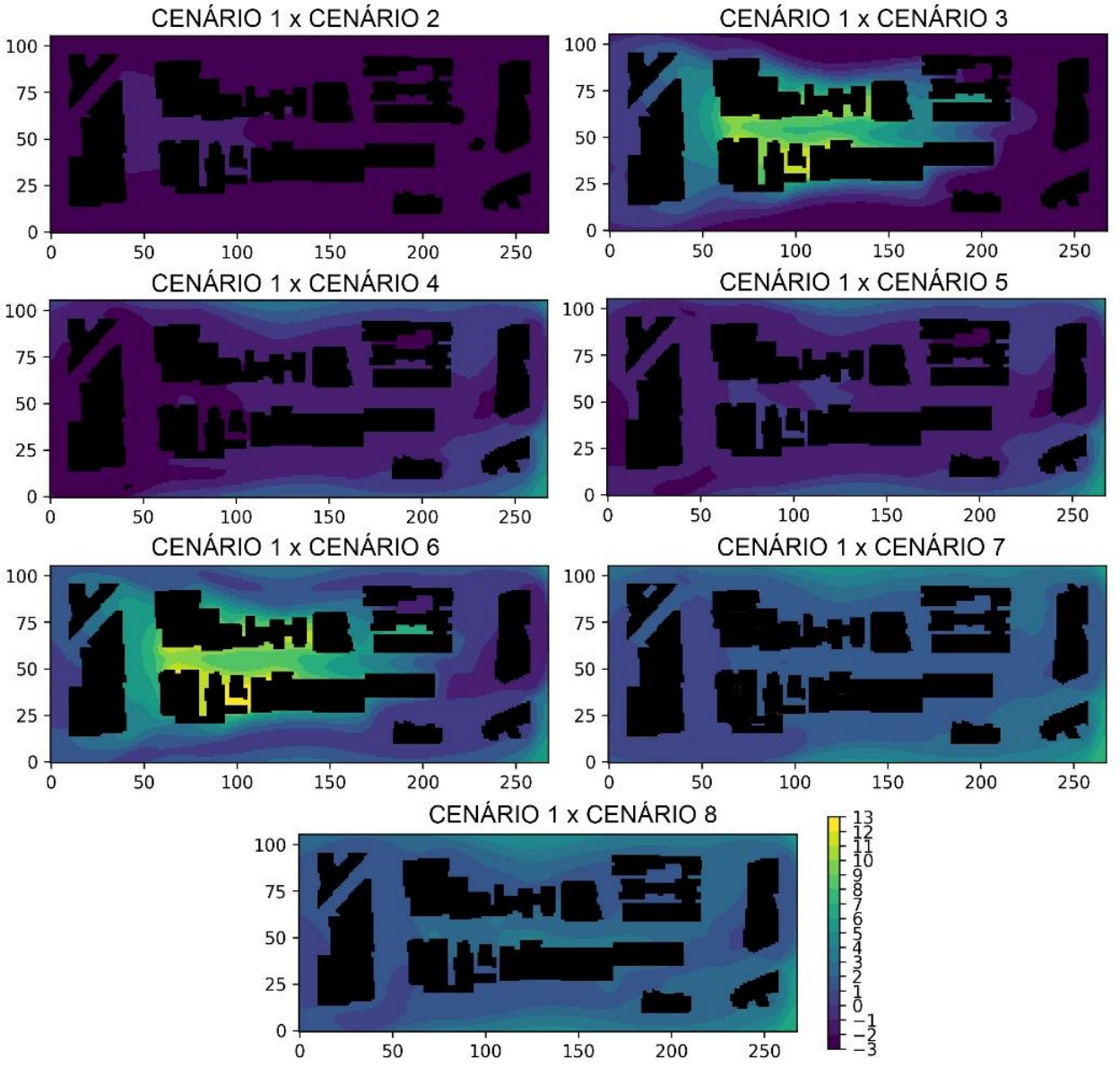
Nos cenários apenas com árvores (cenários 4, 7 e 8), a redução da temperatura do ar foi mais significativa ao redor das copas. A maior diferença pontual da temperatura do ar encontrada entre os cenários 1 e 4 foi de 0,4 °C, entre os cenários 1 e 7 foi de 0,6 °C e entre os cenários 1 e 8 foi de 0,9 °C.

Figura 14: Corte Longitudinal no eixo da Rua Fernando Osório com indicação da diferença de temperatura do ar (°C) entre as simulações do cenário 1 e os demais cenários, no horário de 13:00.



A Figura 15 apresenta as plantas baixas na altura de 1,5 metros em relação ao solo, enquanto a Figura 16 mostra os cortes longitudinais no eixo da Rua Fernando Osório, com a diferença da umidade relativa do ar (%) entre o cenário 1 e os demais cenários, no horário das 13:00 do dia 11 de setembro de 2018. A maior diferença na Umidade Relativa do Ar simulada foi de 12%, observada entre o cenário inicial (cenário 1) e o cenário com 12 árvores, coberturas e fachadas verdes (cenário 6), nas coordenadas X = 69,5 m e Y = 55,5 m.

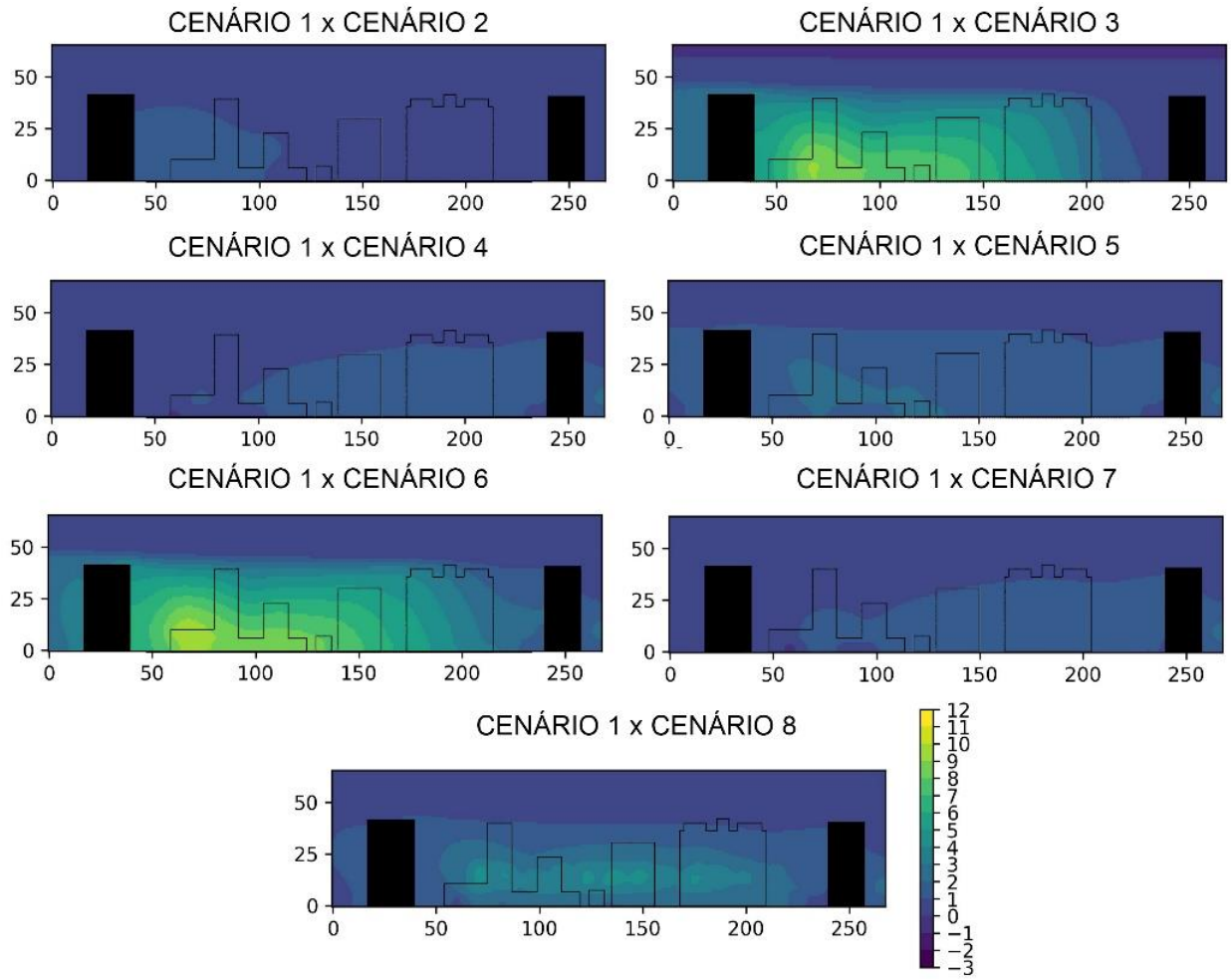
Figura 15: Planta Baixa com indicação da diferença da umidade relativa do ar (%) entre as simulações do cenário 1 e os demais cenários, na altura de 1,5m, no horário de 13:00.



Os cortes longitudinais (Figura 16) indicam os efeitos da vegetação na umidade relativa do ar em diferentes alturas. Os cenários com uso de vegetação nas fachadas (Cenários 3 e 6) apresentaram as maiores diferenças médias de umidade relativa ao longo de toda a altura das edificações. A maior diferença pontual da umidade relativa do ar simulada encontrada entre os cenários 1 e 3 foi de 9%, e entre os cenários 1 e 6 foi de 10%.

Nos cenários somente com árvores (cenários 4, 7 e 8), o aumento da umidade relativa do ar foi mais acentuado ao redor das copas. A maior diferença pontual da umidade relativa do ar encontrada entre os cenários 1 e 4 foi de 3%, entre os cenários 1 e 7, foi de 3%, e entre os cenários 1 e 8 foi de 5%.

Figura 16: Corte Longitudinal no eixo da Rua Fernando Osório com indicação da diferença da umidade relativa do ar (%) entre as simulações do cenário 1 e os demais cenários, no horário de 13:00.



As consideráveis diferenças nas metodologias entre as pesquisas que utilizam simulações com o ENVI-met demandam cuidado na comparação de seus resultados. No entanto, valores similares aos da presente pesquisa foram encontrados por Minella e Krüger (2017) para a cidade de Curitiba, com o uso do ENVI-met versão 3.1, apresentando uma diferença máxima pontual de 1,1 ºC, utilizando árvores de 15 m de altura e copa densa no eixo de uma avenida não arborizada.

Valores menores foram encontrados por Shinzato e Duarte (2018), na cidade de São Paulo, no período da primavera, com o uso do ENVI-met 3.1. A pesquisa apresentou uma

diferença máxima pontual de 0,9 ºC, na temperatura do ar entre um ponto sem vegetação na rua e outro ponto abaixo de uma árvore densa, com índice de área foliar (LAI) = 5,0 m^2 / m^2.

Em relação ao uso de vegetação nas fachadas, os resultados encontrados por Cui *et al*. (2024) para diferentes cenários em simulações de um cânion urbano em Shenzen, na China, durante um dia de verão, foram inferiores aos da presente pesquisa. Foi encontrada uma diferença máxima pontual de 0,4 ºC na temperatura do ar e de 3% da umidade relativa do ar entre o cenário da rua sem vegetação e com vegetação nas fachadas. Entretanto, a simulação foi conduzida em uma modelagem hipotética, sem a presença de árvores, com apenas uma edificação em cada lado da rua, e um comprimento de 80 metros, portanto com menor área de fachada disponível para aplicação de vegetação.

A redução na temperatura do ar, no nível do pedestre, promovida pelas coberturas com vegetação encontrada por Luo *et al*. (2024) em Shangai, na China, utilizando simulações com Envi-met, é similar aos resultados da presente pesquisa. A variação encontrada pelos autores foi entre 0,1 ºC e 0,2 ºC conforme a tipologia e densidade das edificações da rua.

O tempo de processamento exigido pelo ENVI-met dificulta muito a realização de simulações complexas. Mesmo com o uso de computadores de alto desempenho, as simulações realizadas na Rua Fernando Osório levaram em média 13 dias por cenário. O uso complementar da linguagem de programação *Python* acelerou significativamente a análise dos dados gerados pelo ENVI-met, além de fornecer recursos adicionais, como a comparação e geração de gráficos para diferentes cenários.

A versão do *software* ENVI-met 5, utilizada na presente pesquisa, inclui aprimoramentos e cálculos mais precisos, aumentando a radiação global incidente e o potencial de sombreamento e evapotranspiração da vegetação, o que pode justificar as diferenças entre as pesquisas. O site do *software* já anunciou ainda para o ano de 2024 uma nova versão que irá melhorar a precisão dos efeitos da vegetação no clima urbano e sua relação com a disponibilidade de água no terreno. Portanto, as pesquisas realizadas até o momento podem ter seus resultados alterados com o uso das novas versões do *software*.

5 Conclusão

Neste estudo, o *software* ENVI-met foi utilizado para analisar a influência da vegetação na temperatura e umidade relativa do ar em diferentes cenários propostos na Rua Fernando Osório, no bairro do Flamengo, Rio de Janeiro. As simulações computacionais consideraram distintas quantidades e espécies arbóreas, além de fachadas e coberturas vegetadas, para subsidiar projetos de urbanismo em áreas consolidadas, indicando as melhores estratégias para a implantação sustentável de vegetação.

Os resultados obtidos ao longo do dia 11 de setembro, com o uso de simulações computacionais, indicam que uma distribuição equidistante de 12 árvores de pequeno porte e baixo LAI, ao longo da rua, promoveu uma redução média na temperatura do ar de 0,3 ºC, e uma redução máxima pontual de 0,4 ºC, enquanto para a umidade relativa do ar, a diferença média foi de 1%, e a máxima pontual de 3%. Em comparação com o cenário 8, com a implantação de 12 árvores de grande porte e alto LAI, a diferença média foi de 0,4 ºC para a temperatura do ar e 3% para a umidade relativa do ar e as diferenças máximas pontuais foram de 0,9 ºC e 12% respectivamente.

Além da proteção no nível do pedestre, as árvores influenciaram a temperatura e umidade relativa do ar, principalmente na altura de suas copas. As simulações realizadas no eixo da rua, no cenário 8, com árvores de grande porte, resultaram em reduções na temperatura do ar pontuais de até de 0,9 ºC, e aumento da umidade relativa do ar em até 5%.

As simulações indicaram que as fachadas com vegetação tiveram o maior impacto no microclima da rua, quando comparadas com os outros suportes de vegetação, com diferenças na temperatura do ar pontuais de até de 1,2 ºC e na umidade relativa do ar de até 12% no nível da rua. A aplicação de coberturas vegetadas na Rua Fernando Osório teve baixo impacto sobre a temperatura e a umidade relativa do ar ao nível do pedestre. O efeito foi mais perceptível nas áreas com prédios de dois pavimentos, onde a proximidade das coberturas com a rua aumentou sua influência no nível do solo, alcançando diferenças pontuais na temperatura do ar de até 0,2 ºC e na umidade relativa do ar de até 2%, tanto no nível do solo quanto próximo as coberturas.

O trecho da rua entre as abscissas 180 m e 220 m, onde estão localizadas as edificações mais altas (60m e 48m), apresentou as menores variações de temperatura e umidade relativa do ar entre os cenários simulados, com diferença média na temperatura do ar de 0,4 ºC e na umidade relativa do ar de 6%, no nível do solo, nos cenários 3 e 6. Essas edificações oferecem poucas áreas livres para a implantação de vegetação nas fachadas. Além disso, a proporção entre a altura e a largura do *canyon* urbano, aliada à orientação leste-oeste da rua, impede a penetração da radiação solar ao nível do solo.

Os resultados encontrados podem colaborar para o desenvolvimento de estratégias que visem melhorar o conforto térmico e a eficiência energética das cidades. Como continuidade e consolidação das conclusões do presente estudo, são sugeridas simulações com um número maior de dias, em diferentes épocas do ano, e em ruas com características distintas.

Referências

AKBARI, Hashem. Potentials of urban heat island mitigation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 11., Santorini, Grécia. **Anais** [...]. 2005. p. 13.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, 2013. v. 22, n. 6, p. 711–728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

BAO, Jin; XU, Lihua; SHI, Yijun; MA, Qiwei; LU, Zhangwei. The influence of street morphology on thermal environment based on ENVI-met simulation: a case study of Hangzhou core area, China. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 2023. v. 12, n. 8, p. 303. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi12080303.

BARROS, C. P. G.; COSTA, S. B.; BARBOSA, R. V. R. Vegetação e microclima urbano: estudo de caso em ruas residenciais de bairros litorâneos em Maceió-Alagoas. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 7., Maceió, Alagoas. **Anais** [...]. Maceió. 2016.

BONAN, Gordon B. **Effects of land use on the climate of the United States**. Climate Change, 1997. n. 37, p. 449–486. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1005305708775.

BOZONNET, Emmanuel; DOYA, Maxime; ALLARD, Francis. Cool roofs impact on building thermal response: a French case study. **Energy and Buildings**, 2011. v. 43, n. 11, p. 3006–3012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.017.

BRUSE, Michael. Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a multi-agent system. In: WITTKOPF, St.; TAN, B. K. 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA. **Anais** [...]. 2007. p. 699-706.

CARFAN, Ana Cláudia. **Análise do conforto térmico em áreas abertas no município de Ourinhos – SP**. 2011. 2011. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARFAN, Ana Cláudia; GALVANI, Emerson; NERY, Jonas Teixeira. Study of the microclimate effect in the urban vertical structure in Ourinhos, São Paulo State. **Acta Scientiarum Technology**, 2012. v. 34, n. 3, p. 313–320. DOI: https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v34i3.12322.

CUI, Dongjin; CHEN, Yutong; ZHANG, Yu; LI, Xiangyi. A study on the effect of vertical greening on the thermal environment of street canyons based on ENVI-met simulation. E3S Web of Conferences. v. 490. Anais[...]. 2024. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449003004.

DAS, Niamjit. Modeling develops to estimate leaf area and leaf biomass of Lagerstroemia speciosa in West Vanugach Reserve Forest of Bangladesh. **ISRN Forestry**, 2014. v. 2014, p. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1155/2014/486478.

EMMANUEL, Rohinton; ROSENLUND, Hans; JOHANSSON, Erik. Urban shading: a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. **Int. J. of Climatology**, 2007. v. 27, n. 14, p. 1995–2004. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.1609.

FEBLES, E. A. Ventosa. **Ecology and reproductive biology of Trichilia Triacantha Urb. (Meliaceae)**. 1997. Tese (Mestrado em Biologia) – University of Puerto Rico Mayagüez Campus, Mayagüez, Porto Rico ,1997.

GAITANI, Niki; MIHALAKAKOU, Giouli; SANTAMOURIS, Mat. On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces. **Building and Environment**, 2007. v. 42, n. 1, p. 317–324. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.018.

GARCÍA, Ricardo J Santiago. **Performance of native tree species planted under nurse trees for dry forest restoration in Puerto Rico**. 2010. Tese (Mestrado em Agronomia) – University of Puerto Rico Mayagüez Campus, Mayagüez, Porto Rico , 2010.

GILL, Susannah; HANDLEY, John F.; ENNOS, Adrian Roland; PAULEIT, Stephan. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. **Built Environment**, 2007. v. 33, n. 1, p. 115–133. DOI: https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115.

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

GUSSON, Carolina dos Santos; DUARTE, Denise Helena Silva; Effects of built density and urban morphology on urban microclimate: calibration of the model ENVI-met V4 for the subtropical Sao Paulo, Brazil. Em: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COUNTERMEASURES TO URBAN HEAT ISLAND, 4., Singapura. **Anais** [...]. Singapura: Procedia Engineering. 2016.

IBGE. **Brasil em números**. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2/bn_2021_v29.pdf. Acesso em: 23 jun. 2022.

LASMAR, Caio Ismael de Jesus; NUNES, Dorisvalder Dias. Elementos morfológicos urbanos e o campo termo-higrométrico na cidade de Porto Velho (RO). **Revista Brasileira de Climatologia**, 2022. v. 31, p. 180–206. DOI: https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15860.

LEVINSON, Ronnen; BERDAHL, Paul; BERHE, Asmeret Asefaw; AKBARI, Hashem. Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane. **Atmospheric Environment**, 2005. v. 39, n. 40, p. 7807–7824. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.08.037.

LIU, Zhixin; CHENG, Ka Yuen; SINSEL, Tim; SIMON, Helge; JIM, C.Y.; MORAKINYO, Tobi Eniolu; HE, Yueyang; YIN, Shi; OUYANG, Wanlu; SHI, Yuan; NG, Edward. Modeling microclimatic effects of trees and green roofs/façades in ENVI-met: sensitivity tests and proposed model library. **Building and Environment**, v. 244, p. 110759. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110759.

LOIS, Erika; LABAKI, Lucila Chebel. Conforto térmico em espaços externos: uma revisão. In: ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, VI., São Pedro. **Anais** [...]. 2001.

LORENZI, Harri. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. São Paulo: Editora Plantarum. 1992.

LUO, Tianqing; LIU, Yifan; ZHAI, Yujia; GONG, Xiuqi. Is LCZ Enough? Physical Properties, Thermal Environments and Cooling Effects of Green Roofs in High-Density Urban Industrial Blocks. **Land**, v. 13, n. 10, p. 1642, 9 out. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land13101642./

MATHIEU, Renaud; FREEMAN, Claire; ARYAL, Jagannath. Mapping private gardens in urban areas using object-oriented techniques and very high-resolution satellite imagery. **Landscape and Urban Planning**, 2007. v. 81, p. 179–192. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.11.009.

MINELLA, Flavia Cristina Osaku, KRÜGER, Eduardo Leite. Proposição do índice "fração vegetada" e sua relação com alterações na temperatura do ar e no conforto térmico no período diurno e em situação de verão para Curitiba. **Ambiente Construído**. 2017. v. 17(1), DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100139.

MUGHAL, Muhammad Omer; KUBILAY, Aytac; YÜCEL, Mehmet; AFACAN, Osman. Urban heat island intensity in Erzincan City: effects of urbanization and water bodies. **Atmosphere**, 2019. v. 10, n. 9, p. 543. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos10090543.

NOVAES, Gabriel Bonansea De Alencar; MONTEIRO, Leonardo Marques. Calibração do ENVI-met para simulações termodinâmicas de espaços urbanos abertos em dias quentes. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4, p. 275–297, dez. 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000400640.

OKE, Timothe. R. The micrometeorology of the urban forest. **Philosofical Transaction of the Royal Society B**, Londres, n. 324, p. 335–349, 1988. DOI: 10.1098/rstb.1989.0051.

OLIPHANT, Travis E. Python for scientific computing. **Computing in Science & Engineering**, v. 9, n. 3, p. 10-20, 2007. DOI: 10.1109/MCSE.2007.58.

PENG, Lilliana; JIM, C. Green-Roof Effects on Neighborhood Microclimate and Human Thermal Sensation. **Energies**, v. 6, n. 2, p. 598–618, 25 jan. 2013. DOI: https://doi.org/10.3390/en6020598.

RIO DE JANEIRO, Prefeitura Municipal do. Meio Ambiente. Parques e Jardins. **Plano Diretor de Arborização Urbana da Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2015.

SFAKIANAKI, Aikaterini; PAGALOU, Elli; PAVLOU, Konstantinos; SANTAMOURIS, Mat; ASSIMAKOPOULOS, M. N. Theoretical and experimental analysis of the thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece. **Int. J. Energy Res.**, v. 33, p. 1059-1069, 2009. DOI: https://doi.org/10.1002/er.1535.

SHINZATO, Paula; SIMON, Helge; DUARTE, Denise Helena Silva; BRUSE, Michael. Calibration process and parametrization of tropical plants using ENVI-met V4: Sao Paulo case study. **Architectural Science Review**, v. 62, n. 2, p. 112-125, 2018.

SHINZATO, Paula. **Impacto da vegetação nos microclimas urbanos em função das interações solo-vegetação-atmosfera**. 2014. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. DOI: 10.11606/T.16.2014.tde-12092014-115829. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-12092014-115829/. Acesso em: 22 dez. 2021.

SHINZATO, Paula; DUARTE, Denise Helena Silva. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. Ambiente Construído, v. 18(2), 2018, DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200250

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, 2012. DOI: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

TAHA, Haider; AKBARI, Hashem; ROSENFELD, Arthur; HUANG, Joe. Residential cooling loads and the urban heat island—the effects of albedo. **Building and Environment**, v. 23, n. 4, p. 271–283, 1988. DOI: https://doi.org/10.1016/0360-1323(88)90033-9.

THEODOSIOU, Theodore. Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental Behaviour. **Adv. Build. Energy Research**, v. 3, p. 271–288, 2009. DOI: https://doi.org/10.3763/aber.2009.0311.

WALES, Scott. **Reading ENVI_MET files**. 2022. Disponível em: https://climate-cms.org/posts/2018-04-24-reading-envi-met.html. Acesso em: 26 ago. 2024.

WANG, Haihua; CAI, Yue; DENG, Weifen; LI, Chong; DONG, Ya; ZHOU, Lv; SUN, Jingyi.; LI, Chen; SONG, Bingzheng; ZHANG, Fangfang; ZHOU, Guomo. The Effects of Tree Canopy Structure and Tree Coverage Ratios on Urban Air Temperature Based on ENVI-Met. **Forests**, v. 14, n. 1, p. 80, 1 jan. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/f14010080.

XIAO, Tieqiao; SHENG, Lalan; ZHANG, Shaojie; ZHENG, Licheng; SHUI, Taotao. Thermal Comfort Improvement Strategies for Outdoor Spaces in Traditional Villages Based on ENVI-met: Shimengao Village in Chizhou City. **Sustainability**, v. 15, n. 15, p. 11785, 31 jul. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/su151511785.