XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Efeito da tipologia de quadras urbanas na qualidade do ar por meio de simulação ENVI-met da dispersão de NO_2 e PM10

Efecto de la tipología de manzanas urbanas en la calidad del aire mediante simulación ENVI-met de la dispersión de NO_2 y PM10

Effect of urban block typology on air quality through ENVI-met simulation of NO_2 and PM10 dispersion

CLIMA E PLANEJAMENTO URBANO

Girotti, Carolina

Doutoranda, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP), São Paulo, Brasil, cgirotti@usp.br

Lopes, António

Professor Doutor, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, antonio.lopes@edu.ulisboa.pt

Kurokawa, Fernando Akira

Professor Doutor, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLIUSP), São Paulo, Brasil, fernando.kurokawa@usp.br

Shimomura, Alessandra Rodrigues Prata

Professora Doutora, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP), São Paulo, Brasil, arprata@usp.br

Resumo

Esta pesquisa analisou a relação entre a tipologia de quadras urbanas e a dispersão de NO_2 e PM10, usando o modelo ENVI-met. Foram estudadas seis tipologias: vertical, perimetral, semiaberta, aberta e em fila. Tipologias compactas e com pátios centrais apresentaram maiores concentrações de poluentes por restringirem a circulação do ar, mas também podem criar corredores de vento que melhoram a qualidade do ar em avenidas principais. A pesquisa destacou a influência da razão altura-largura e do fator de visibilidade do céu na dispersão dos poluentes. Ambientes mais abertos, com menores razões altura-largura e maior visibilidade do céu, favorecem a circulação do ar e reduzem a poluição. Esses achados ressaltam a importância de integrar a morfologia urbana ao planejamento para mitigar a poluição e melhorar a saúde pública.

Palavras-chave: Morfologia urbana. Dispersão de poluentes atmosféricos. Microclima urbano. ENVI-met.

Resumen

Esta investigación analizó la relación entre la tipología de manzanas urbanas y la dispersión de NO_2 y PM10, utilizando el modelo ENVI-met. Se estudiaron seis tipologías: vertical, perimetral, semiabierta, abierta y en fila. Las tipologías compactas y con patios centrales presentaron mayores concentraciones de contaminantes al restringir la circulación del aire, pero también pueden generar corredores de viento que mejoran la calidad del aire en las principales avenidas. La investigación destacó la influencia de la relación altura-anchura y el factor de visibilidad del cielo en la dispersión de los contaminantes. Los entornos más abiertos, con menores relaciones altura-anchura y mayor visibilidad del cielo, favorecen la circulación del aire y reducen la contaminación. Estos hallazgos subrayan la importancia de integrar la morfología urbana en la planificación para mitigar la contaminación y mejorar la salud pública.

Palabras clave: Morfología urbana. Dispersión de contaminantes atmosféricos. Microclima urbano. ENVI-met.

Abstract

This research analyzed the relationship between urban block typology and the dispersion of NO_2 and PM10 using the ENVI-met model. Six typologies were studied: vertical, perimeter, semi-open, open, and row. Compact typologies and those with central courtyards showed higher pollutant concentrations due to restricted air circulation but can also create wind corridors that improve air quality along major avenues. The study highlighted the influence of the height-to-width ratio and sky view factor on pollutant dispersion. More open environments, characterized by lower height-to-width ratios and greater sky visibility, promote better air circulation and reduce pollution. These findings emphasize the importance of integrating urban morphology into planning to mitigate pollution and improve public health.

Keywords: Urban morphology. Atmospheric pollutant dispersion. Urban microclimate. ENVI-met.

Introdução

A poluição atmosférica tornou-se uma questão crítica em grandes áreas metropolitanas, impactando a saúde pública. A baixa qualidade do ar está associada a diversas doenças, incluindo enfermidades respiratórias e cardiovasculares (World Health Organization, 2015).

Em várias cidades, os poluentes originados pelo tráfego veicular são a principal fonte de emissões atmosféricas (Girotti *et al*., 2024). Nos centros urbanos, a porosidade e a rugosidade das edificações afetam os padrões de vento, interferindo diretamente no transporte e na dispersão dos poluentes (Ratti *et al*., 2006). A configuração das quadras urbanas modifica essa dispersão, especialmente dos poluentes relacionados ao tráfego. Estudos indicam que diferentes tipologias de quadras influenciam significativamente a concentração e a dispersão de poluentes atmosféricos (Fu *et al*., 2017; He *et al*., 2018; Ramponi *et al*., 2015).

Variações na altura das edificações podem melhorar a ventilação e reduzir as concentrações de poluentes (Kurppa *et al*., 2018). Além disso, o desempenho das diferentes tipologias de quadras depende dos índices urbanos, nas quais a redução da cobertura superficial, associada ao aumento da altura das edificações, favorece a ventilação. No entanto, essa estratégia pode impactar o desempenho das tipologias quanto à qualidade do ar (Trindade da Silva *et al*., 2021).

Nesta pesquisa, foi utilizado o ENVI-met, um software CFD tridimensional desenvolvido para simular interações complexas entre superfícies, vegetação e ar no microclima urbano, incluindo a dispersão de poluentes atmosféricos (ENVI-met GMBH, 2021). Dessa forma, o objetivo deste artigo é avaliar o impacto da tipologia de quadras urbanas na dispersão de NO_2 e PM10 por meio de simulações no ENVI-met na Avenida Rebouças, uma área de tráfego intenso e rápida transformação do uso do solo na cidade de São Paulo.

Metodologia

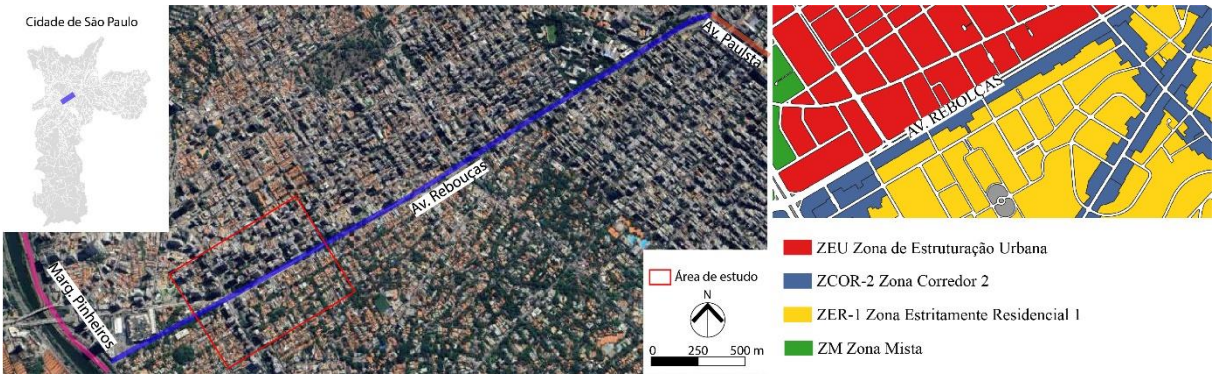
Estudo de caso

A Avenida Rebouças, no bairro Pinheiros, em São Paulo, foi escolhida como estudo de caso devido às transformações urbanas na região. Pinheiros, um dos bairros mais antigos da cidade, passou de uma área rural para uma zona mista, com grande conectividade, sendo atendido pela Linha 4-Amarela do metrô e várias linhas de ônibus. Nos últimos anos, o bairro passou

por um processo de verticalização, afetando a densidade populacional e a qualidade de vida local.

A Avenida Rebouças conecta áreas importantes, como a Avenida Paulista e a Marginal Pinheiros, e possui diferentes zonas de uso e ocupação do solo, como a Zona de Estruturação Urbana (ZEU), que favorece o adensamento, e a Zona Estritamente Residencial (ZER), onde o adensamento é restrito. Isso resulta em um contraste na paisagem ao longo da avenida, com áreas de alta verticalização e outras de edificações de baixa altura, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1: Localização da Av. Rebouças e uso do solo.



Fonte: Autores (2025).

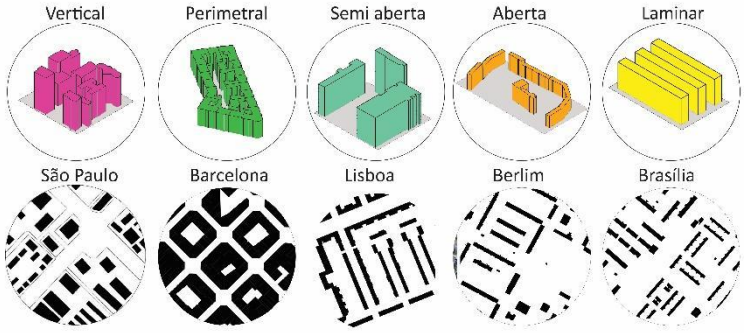
O estudo visa compreender o impacto da forma urbana da Avenida Rebouças na dispersão de poluentes atmosféricos, como NO_2 e PM10, devido ao intenso fluxo de veículos. Foram criados seis cenários com diferentes tipologias de quadras, baseados em cidades como São Paulo, Barcelona, Lisboa, Berlim e Brasília, além de analisar o cenário atual (Figura 2). As características dos cenários, como altura máxima das edificações, razão altura/largura (H/W) e fator de visão do céu (SVF), estão detalhadas na Tabela 1.

Simulação ENVI-met

O ENVI-met é um software de dinâmica de fluidos computacional (CFD) tridimensional, utilizado para simular interações entre superfícies, vegetação e ar no microclima urbano (Bruse e Fleer, 1998; ENVI-met GMBH, 2021). Ele calcula o campo de vento com as equações tridimensionais não hidrostáticas de Navier–Stokes, utilizando o modelo de fechamento k-ε de ordem 1,5 e o Método das Diferenças Finitas. O módulo de dispersão de poluentes do ENVI-met modela a liberação, dispersão e deposição de até seis poluentes, incluindo NO_2 e PM10,

focando na simulação do microclima urbano e na dispersão de poluentes, com vegetação detalhada. Neste estudo, foram realizadas simulações utilizando a versão 5.5.1 do ENVI-met (Bruse e Fleer, 1998).

Figura 2: Tipologias de quadras analisadas baseadas nas cidades de São Paulo (vertical), Barcelona (perimetral), Hamburgo (semiaberta), Berlim (aberta) e Brasília (laminar), além do cenário atual**.**



Fonte: Autores (2025).

Tabela 1: Cenários aplicados na simulação com alturas máximas das edificações, razões H/W e fatores de visibilidade do céu para cada tipologia de quadra urbana.

Cenários	Altura máx. (m)	H/W (cânion)	H/W (entre edificações)	SVF (cânion)	SVF (entre edificações)
Atual	95	1.30	0.40	0.78	1.0
Vertical	99	2.40	2.90	0.40	0.20
Perimetral	99	1.70	2.80	0.47	0.02
Semi aberta	99	1.70	6.00	0.61	0.31
Aberta	99	1.50	3.40	0.44	0.36
Laminar	99	1.70	0.60	0.50	0.32

Fonte: Autores (2025).

Para a simulação no ENVI-met, foi utilizado um domínio de simulação centrado na Avenida Rebouças, importante via da cidade de São Paulo, Brasil (23° 33' 55" S, 46° 40' 50" W), situada a uma altitude de 750 metros acima do nível do mar. O modelo tridimensional do cenário atual foi desenvolvido utilizando o software QGIS (QGIS Association, 2024), a partir de arquivos *.shp de edificações e árvores fornecidos pelo GeoSampa da Prefeitura Municipal de São Paulo (SÃO PAULO, 2024). Esses dados foram convertidos para arquivos *.inx do ENVI-met utilizando o plug-in de geodados (ENVI-met, 2024).

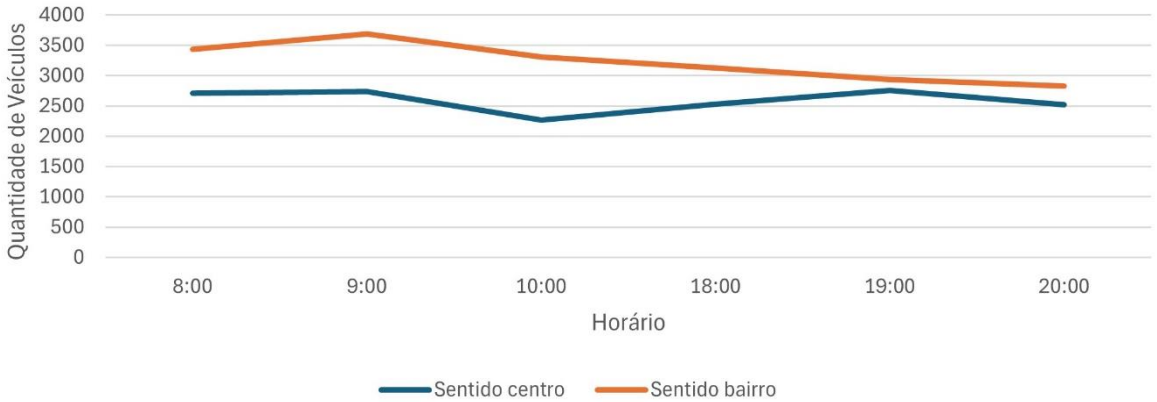
Após a simulação do cenário atual, cada tipologia foi modelada individualmente no ENVI-met Spaces, mantendo-se o mesmo domínio espacial, respeitando a proporção das H/W e SVF descritas na Tabela 1.

O domínio de simulação possui uma área de 519 m x 378 m, com altura vertical de 212,90 m e grade variável, com resolução horizontal de 3 m x 3 m e variação vertical de 0,4 m nas primeiras camadas a 5 m em altitudes mais altas, utilizando fator telescópico de 25% para altitudes superiores a 60 m. O modelo conta com buffers nas fronteiras para evitar problemas numéricos, totalizando 173 x 125 x 15 células de grade. Para os parâmetros de solo e superfície, foi utilizado asfalto nas ruas (albedo 0,12; emissividade 0,9), grama nas áreas verdes (albedo 0,2; emissividade 0,97) e pavimento de concreto nas demais áreas (albedo 0,3; emissividade 0,9).

Quantidade de veículos e Emissões

A contagem de veículos na Avenida Rebouças foi realizada com base no relatório "Mobilidade no Sistema Viário Principal: Volumes e Velocidades 2019" (Companhia de Engenharia de Tráfego, 2020), o mais recente disponível. Os dados abrangem duas horas de pico: das 8h às 10h e das 18h às 20h, considerando ambos os sentidos da Avenida Rebouças (trecho entre Al. Lorena e R. Oscar Freire), conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Quantidade de veículos na Av. Rebouças (Companhia de Engenharia de Tráfego, 2020).



Fonte: Autores (2025).

Os dados de tráfego na Avenida Rebouças indicam que o pico ocorreu entre 8h e 9h, com contagens de 3.435 e 3.687 veículos no sentido saída, indicando um alto volume de tráfego saindo do centro da cidade. Após as 10h, há uma leve diminuição, mas o tráfego no sentido

saída continua intenso. À noite, observa-se padrão semelhante, com pico às 18h, com 3.130 veículos no sentido saída e 2.530 no sentido entrada. Às 19h, o tráfego no sentido entrada sobe para 2.757 veículos, enquanto no sentido saída diminui ligeiramente para 2.932. O tráfego permanece alto até as 20h, com 2.520 veículos no sentido entrada e 2.829 no sentido saída. Esses dados refletem a tendência de maior movimento no sentido saída, tanto pela manhã quanto à noite, com redução gradual do volume de tráfego após as horas de pico.

As emissões foram atribuídas como fontes lineares contínuas ao longo da Avenida Rebouças, utilizando o módulo de poluição do ENVI-met. Considerou-se emissão constante durante as duas horas de pico com base nos dados de quantidade de veículos CET (2020) e nos fatores de emissão da CETESB (2020), considerando os tipos de veículos e seus anos de fabricação. Os valores de emissão considerados foram 0.008678 para PM10 e 0.49865 para NO_2 .

Condições de contorno

As simulações foram conduzidas utilizando 10 anos de dados climáticos extraídos do arquivo climático *.epw do Aeroporto de Congonhas, localizado aproximadamente 8 km a sudeste da área de estudo. As simulações foram realizadas por um período de 48 horas, com foco no dia 3 de julho de 2023, e os resultados foram extraídos às 9h, levando em consideração o inverno, que, segundo outros autores (Girotti *et al*., 2025a), é a estação com maior concentração de PM10 em São Paulo, com alta concentração de poluentes atmosféricos em São Paulo, além do pico de tráfego observado nesse horário.

O modelo tridimensional do ENVI-met foi encapsulado em um modelo unidimensional, que forneceu as condições de contorno necessárias para simular os processos atmosféricos dentro da camada limite até 2500 m de altura.

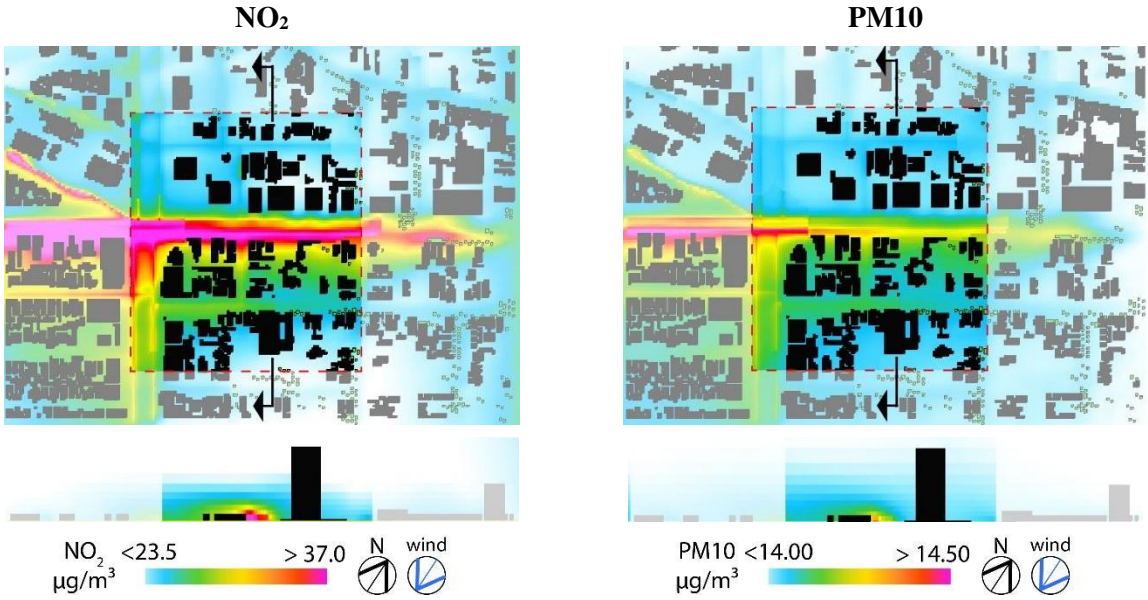
O perfil de entrada foi calculado com um modelo unidimensional, considerando a rugosidade da superfície, e usado como referência e condição de contorno superior para o modelo tridimensional aninhado (Bruse e Fleer, 1998). A malha tridimensional foi subdividida em células e seguiu-se a recomendação de subdividir as cinco primeiras células verticais para maior precisão nos cálculos próximos à superfície (Bruse e Fleer, 1998; Wania *et al.,* 2012). As condições de contorno laterais e superiores foram calculadas com o modelo unidimensional, aplicando-se a condição de não deslizamento nas superfícies e gradiente zero nas fronteiras de saída (Bruse e Fleer, 1998).

As concentrações de fundo foram integradas à simulação como dados iniciais, utilizando medições de uma estação de monitoramento urbano da Qualar (CETESB, 2025), localizada a cerca de 3 km a noroeste do domínio. Para o período da simulação, as concentrações de fundo foram definidas como 30,00 µg/m³ para NO_2 e 14,00 µg/m³ para PM10. Com esses dados estabelecidos, o ENVI-met gerou perfis que foram utilizados como condições de contorno de entrada para o modelo.

Resultados e Discussão

A Figura 4 apresenta os resultados da vista superior à altura do pedestre para o cenário atual da dispersão de NO_2 e PM10 na área de estudo da Avenida Rebouças, correspondente ao dia 3 de julho de 2023, às 9h.

Figura 4: Resultados do cenário atual para a dispersão de NO_2 e PM10 ao longo da Avenida Rebouças, considerando a altura do pedestre.

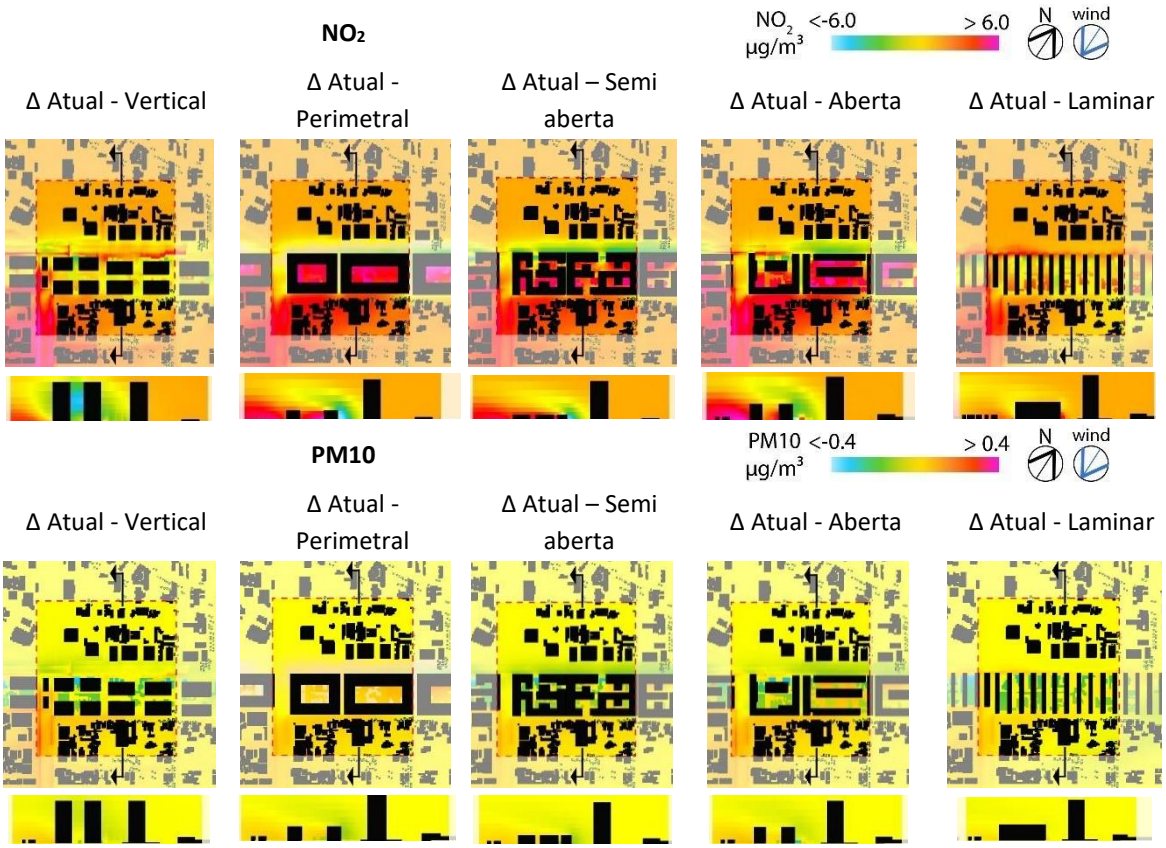


Fonte: Autores (2025).

Os resultados indicam uma diferença significativa nas concentrações de NO_2 e PM10, atribuída às características dos poluentes, sendo o NO_2 mais disperso por ser um gás, enquanto o PM10 tende a se depositar mais facilmente (Grylls e Van Reeuwijk, 2022). Além disso, observa-se que ambos os poluentes se dispersam contra a direção do vento, com uma maior concentração da emissão da Avenida Rebouças no lado Sul.

A Figura 5 apresenta os resultados da vista superior à altura do pedestre, comparando o cenário atual com os cenários alternativos. Valores positivos indicam que a concentração de poluentes é maior nos cenários alternativos, enquanto valores negativos mostram que a concentração de poluentes é maior no cenário atual.

Figure 5: Resultados comparativos entre o cenário atual e os cenários alternativos considerando a altura do pedestre.

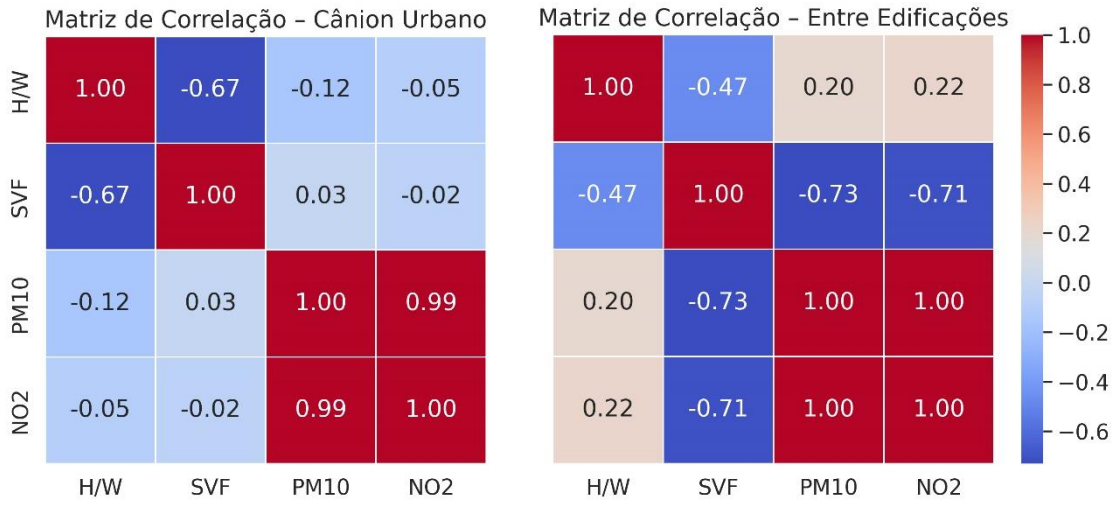


Fonte: Autores (2025).

Os resultados indicam que blocos compactos e com pátios centrais, como as tipologias perimetrais, semiabertas e abertas, exibem maiores concentrações de ambos os poluentes devido à restrição da circulação do ar (Girotti *et. al.*, 2022). Em contraste, blocos verticais e lineares ao longo da Avenida Rebouças mostram concentrações semelhantes ao cenário atual, mas com maior acumulação ao longo da avenida, evidenciando o papel da geometria na dispersão dos poluentes (Kurppa *et al.,* 2018).

Além disso, o estudo sugere que ambientes com maior SVF e menor razão H/W favorecem a dispersão dos poluentes, conforme apontado pelos autores Fu *et al.* (2017), Ramponi *et al.,* (2015) e He *et al*. (2018).

Figure 6: Matriz de correlação considerando H/W, SVF e poluentes no cânion urbano e entra as edificações alteradas nos diferentes cenários.



Fonte: Autores (2025).

A análise das matrizes de correlação revela diferenças importantes entre os padrões observados no interior do cânion urbano e entre as edificações. Embora, no cânion urbano, a razão H/W apresente uma correlação moderada e positiva com o NO_2 (0.50) e negativa com o SVF (–0.67), as demais correlações com PM10 são fracas, indicando relações pouco expressivas. Essa menor força das correlações pode ser explicada pela baixa variabilidade dos indicadores geométricos nesse contexto: os valores de H/W e SVF dentro do cânion variam pouco entre os cenários simulados, o que limita a sensibilidade estatística da análise. Em contraste, entre edificações, a variabilidade dos valores de SVF é muito maior — indo de 0.02 a 0.78 — o que contribui para correlações mais fortes, como a observada entre SVF e NO_2 (–0.71). Assim, os dados sugerem que a distribuição espacial dos poluentes é mais sensível às variações morfológicas entre edificações do que dentro do cânion, onde o ambiente tende a ser mais confinado e uniforme.

No entanto, o estudo reconhece limitações no modelo ENVI-met. Embora amplamente utilizado para avaliar a dispersão de poluentes atmosféricos em microclimas urbanos (Rodrigues *et al.,* 2024; Wania *et al.,* 2012), estudos de validação revelam resultados que

variam de aceitáveis a boa concordância (Crank *et al.,* 2018; Detommaso *et al*, 2021). Além disso, o ENVI-met apresenta algumas restrições técnicas ao simular a dispersão de poluentes atmosféricos. Um dos principais desafios é a dificuldade de integrar variações horárias nos níveis de poluentes de fundo, bem como a limitação na calibração dos valores horários para os poluentes emitidos, o que pode comprometer a robustez dos resultados.

Conclusões

Esta pesquisa analisou o impacto da morfologia urbana na dispersão de poluentes atmosféricos, com foco em NO_2 e PM10. Os resultados mostram que tipologias mais fechadas, como quarteirões perimetrais, semiabertos e abertos, tendem a acumular maiores concentrações de poluentes, devido à limitação da ventilação natural. Em contrapartida, tipologias mais abertas, como blocos verticais e laminares, favorecem a circulação de ar, permitindo maior dispersão dos poluentes, especialmente ao longo das avenidas.

Indicadores como o H/W e o SVF revelaram forte relação com a dispersão dos poluentes. Ambientes com menores razões H/W e maiores SVFs apresentaram melhor ventilação e, consequentemente, menores concentrações de NO_2 e PM10. Já em áreas com alta razão H/W, principalmente com fachadas contínuas, observou-se maior acúmulo de poluentes, especialmente sob condições de vento constante.

Esses achados reforçam a importância de considerar a geometria urbana no planejamento ambiental, visando melhorar a qualidade do ar. Estratégias como a variação das alturas das edificações, o aumento dos espaços abertos e a limitação da densidade podem favorecer a ventilação. No entanto, o estudo reconhece limitações do modelo ENVI-met, como a dificuldade de integrar a variação horária da poluição de fundo e de representar com precisão as emissões veiculares em cenários de alta densidade.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo n. 2021/14533-7.

Referências

BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. **Environmental Modelling & Software**, v. 13, n. 3–4, p. 373–384, 1998.

CETESB. **Emissão veicular São Paulo 2019**. 2020. Disponível em: https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/server/api/core/bitstreams/a56245e6-5334-49cd-ae72-625d2dbc8d03/content. Acesso em: 09 abr. 2025.

CETESB. **São Paulo Qualar**. 2025. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/. Acesso em: 02 abr. 2025.

COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO – CET. **Mobilidade no Sistema Viário Principal: volumes e velocidades 2019**. São Paulo: CET, 2020. Disponível em: https://www.cetsp.com.br/media/1113490/relatorio-msvp-2019-revisao-2-junho-22.pdf. Acesso em: 09 abr. 2025.

CRANK, P. J. et al. Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies. **Urban Climate**, v. 26, p. 188–197, dez. 2018.

DETOMMASO, M.; COSTANZO, V.; NOCERA, F. Application of weather data morphing for calibration of urban ENVI-met microclimate models: results and critical issues. **Urban Climate,** v. 38, p. 100895, jul. 2021.

ENVI-MET. **Geodata ENVI-met**. 2025. Disponível em: https://plugins.qgis.org/plugins/geodata2envimet/. Acesso em: 21 fev. 2025.

ENVI-MET GMBH. **ENVI-met Headquarter**. Alemanha, 2021.

U, X. et al. Effects of canyon geometry on the distribution of traffic-related air pollution in a large urban area: implications of a multi-canyon air pollution dispersion model. **Atmospheric Environment**, v. 165, p. 111–121, set. 2017.

GIROTTI, C. et al. Urban mobility and air pollution at the neighbourhood scale in the Megacity of São Paulo, Brazil. **Discover Cities**, v. 1, n. 1, p. 13, 20 ago. 2024.

GIROTTI, C. et al. Air pollution dynamics: the role of meteorological factors in PM10 concentration patterns across urban areas. **City and Environment Interactions**, v. 25, 2025a.

GIROTTI, C.; NAZARETH, S. B. M.; SHIMOMURA, A. R. P. Aerodynamic analysis of urban blocks: case study in open, row and vertical blocks. In: **PLEA 2022** – *The 36th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. p. 332–337, 2022.

GRYLLS, T.; VAN REEUWIJK, M. How trees affect urban air quality: it depends on the source. **Atmospheric Environment**, v. 290, p. 119275, dez. 2022.

HE, Q. et al. The impact of urban growth patterns on urban vitality in newly built-up areas based on an association rules analysis using geographical 'big data'. **Land Use Policy**, v. 78, p. 726–738, nov. 2018.

KURPPA, M. et al. Ventilation and air quality in city blocks using Large-Eddy Simulation—urban planning perspective. **Atmosphere**, v. 9, n. 2, p. 65, 13 fev. 2018.

QGIS ASSOCIATION. **QGIS Geographic Information System**. 2024. Disponível em: http://www.qgis.org/. Acesso em: 21 jun. 2024.

RAMPONI, R. et al. CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths**. Building and Environment**, v. 92, p. 152–166, out. 2015.

RATTI, C.; DI SABATINO, S.; BRITTER, R. Urban texture analysis with image processing techniques: winds and dispersion. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 84, n. 1, p. 77–90, 2006.

RODRIGUES, V. et al. Setting up a CFD model to evaluate the impact of green infrastructures on local air quality. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 17, p. 2151–2167, 20 abr. 2024. SÃO PAULO. PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **GeoSampa**. Disponível em: http://www.geosampa.prefeitura.sp.gov.br/. Acesso em: 01 maio 2017.

TRINDADE DA SILVA, F. et al. The impact of urban block typology on pollutant dispersion. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 210, p. 1–17, 2021.

WANIA, A. et al. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. **Journal of Environmental Management**, v. 94, n. 1, p. 91–101, fev. 2012.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Health and the environment: addressing the health impact of air pollution**. Sixty-Eighth World Health Assembly. Agenda 68/18. Item 14.6, v. 1, n. March, p. 6, 2015.