

AVALIAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS VERDES COMO FORMA DE MITIGAR A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA: ESTUDO DE CASO DE RIBEIRÃO PRETO (SP) COM PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVAS COM SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Palavras-Chave: Qualidade do ar, Soluções Baseadas na Natureza, Planejamento Urbano

Autores(as):

LETÍCIA ROCHA MAGALHÃES, FT – UNICAMP

Prof. Dr. FELIPPE BENAVENTE CANTERAS (orientador), FT - UNICAMP

Prof. Dr. VITOR EDUARDO MOLINA JUNIOR (coorientador), FT - UNICAMP

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar é um problema ambiental grave que afeta a saúde globalmente, com milhões de mortes prematuras atribuídas a ela anualmente, segundo a OMS. Em São Paulo, a qualidade do ar é monitorada pela CETESB, que divulga diariamente boletins sobre concentrações de diversos poluentes, como ozônio, material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}), dióxido de nitrogênio e outros. Partículas menores, como MP_{2,5}, são especialmente perigosas por atingirem os alvéolos pulmonares e a corrente sanguínea, causando sérios problemas de saúde (Amsalu et al., 2019; Schlesinger, 2007 apud SU et al., 2022). Infraestruturas verdes (IVs) têm ganhado reconhecimento como uma solução para reduzir a poluição atmosférica, utilizando elementos naturais que fornecem serviços ambientais, relacionando-se diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Seiwert et al. 2020). Estudos comprovam que a vegetação urbana pode reduzir poluentes atmosféricos, absorvendo substâncias nocivas e armazenando carbono (Fares et al., 2020). Além disso, IVs oferecem conforto térmico, reduzindo temperaturas urbanas (Russo; Escobedo; Zerbe, 2016). No entanto, estudos correlacionando IVs com qualidade do ar ainda são raros na América Latina e no Brasil, apesar da necessidade urgente de alternativas eficazes para melhorar a qualidade do ar em grandes cidades brasileiras.

2. METODOLOGIA

Ribeirão Preto, localizada na região nordeste do Estado de São Paulo (21°10'38" S, 47°48'37" O), possui uma área territorial de 650,916 km² e uma população estimada em 2022 de 698.642 pessoas, com uma densidade demográfica de 1.073,32 hab/km² (IBGE, 2022). A cidade está entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, com uma área urbanizada de 149,42 km², sendo a 4ª região mais urbanizada do Estado de São Paulo (IBGE, 2019). Ribeirão Preto conta com duas redes automáticas de monitoramento da qualidade do ar: Ribeirão Preto e Ribeirão Preto - Ipiranga, que monitoram diversos parâmetros, como CO, MP₁₀, MP_{2,5}, NO, NO₂, NO_x, O₃, entre outros (QUALAR, 2023). A cidade também possui uma rede de monitoramento manual focada em MP₁₀.

Foram realizadas pesquisas no site da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para obter relatórios e boletins de qualidade do ar de 2019 a 2023 em Ribeirão Preto. Com base nesses dados, foram definidos os principais poluentes a serem estudados na região.

Foi realizada uma revisão sistemática de literatura nas bases de dados Scopus e SciELO sobre infraestruturas verdes e qualidade do ar, abrangendo os anos de 2000 a 2024. Termos de busca foram usados em português, inglês e espanhol, incluindo palavras-chave como "infraestruturas verdes", "qualidade do ar", "poluição atmosférica", entre outras. O software Mendeley© foi utilizado para gerenciar as referências e artigos passaram por várias etapas de seleção, desde a busca inicial até a leitura integral dos artigos selecionados.

O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitiu estudar o uso e ocupação do solo em Ribeirão Preto e a distribuição espacial das infraestruturas verdes. Dados vetoriais como o uso e ocupação do solo e áreas com vegetação foram obtidos junto a Prefeitura Municipal e modelados em ambiente SIG., e imagens do Google Earth foram utilizadas para orientação e vetorização das infraestruturas verdes. Imagens de alta resolução do programa Copernicus da União Europeia, Sentinel-2 L2A, com resolução de 10 m também foram usadas para calcular o Índice NDVI e estimar a cobertura vegetal urbana, com a ferramenta i-Tree Canopy sendo empregada para análise da alocação das infraestruturas verdes. Todos os arquivos coletados foram comparados para uma análise mais precisa da região.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Principais poluentes atmosféricos do município

A qualidade do ar é analisada considerando dois padrões: diário (Padrão de Qualidade do Ar diário - PQAr diário) e anual (PQAr anual). Ambos os padrões têm metas intermediárias (MI), estabelecidas pelo Decreto Estadual nº 59113/13, que se tornam progressivamente mais rigorosas até atingir o Padrão Final (PF) da Organização Mundial da Saúde (OMS). O MI1 vigorou de 24/04/2013 a 31/12/2021, sendo substituído pelo MI2 em 01/01/2022, que está em vigor atualmente e está descrito na *Tabela 01*. Para monóxido de carbono, chumbo e partículas totais em suspensão, já são utilizados os Padrões Finais.

As análises dos poluentes atmosféricos, realizadas entre 01/01/2019 e 31/12/2023 através do QUALAR, incluem MP₁₀, MP_{2,5}, O₃, CO, NO, NO₂ e NO_x. O material particulado 10 (MP₁₀) é o poluente mais crítico na região, seguido do material particulado 2.5 (MP_{2,5}), que são os únicos a apresentarem qualidade do ar "muito ruim". O ozônio também teve variações entre

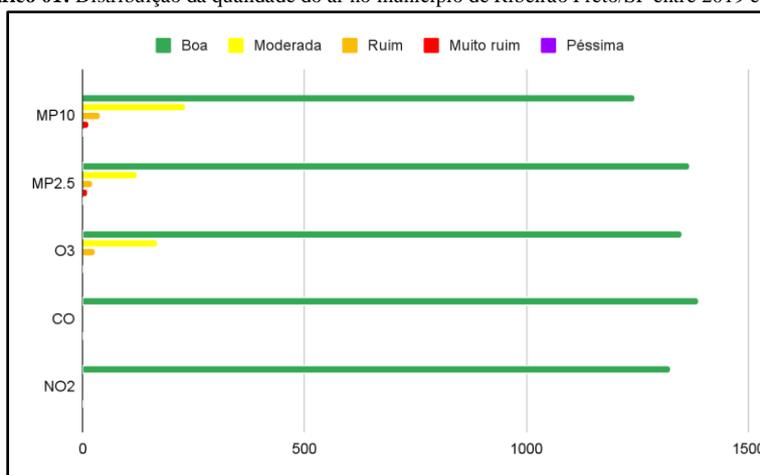
qualidade do ar "boa" e "ruim", mas nenhum poluente analisado atingiu "péssima" qualidade do ar. Por meio dessas análises, foi possível identificar os poluentes mais críticos em Ribeirão Preto, os quais serão objeto de estudo neste trabalho, conforme apresentado no *Gráfico 01*.

Tabela 01: PQAr de curto e longo prazo de acordo com os anos.

	PQAr de curto prazo					PQAR de longo prazo				
	MP10 (µg/m³)	MP2.5 (µg/m³)	O3 (µg/m³)	CO (ppm)	NO2 (µg/m³)	MP10 (µg/m³)	MP2.5 (µg/m³)	O3 (µg/m³)	CO (ppm)	NO2 (µg/m³)
MII (2013 - 2021)	120	60	140	-	260	40	20	-	-	60
MI2 (2022 - atual)	100	50	130	-	240	35	17	-	-	50
MI3	75	37	120	-	220	30	15	-	-	45
PF	50	25	100	9	200	20	10	-	-	40

Fonte: CETESB, 2024.

Gráfico 01: Distribuição da qualidade do ar no município de Ribeirão Preto/SP entre 2019 e 2023.

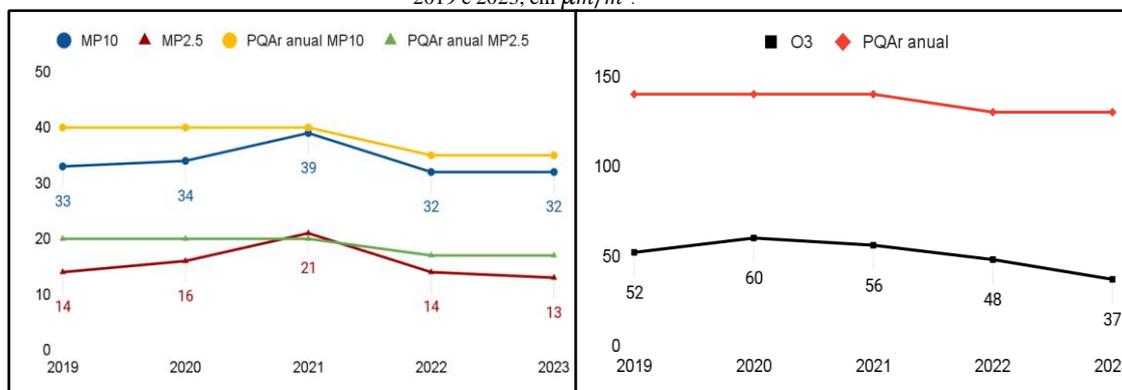


Fonte: QUALAR, 2024.

3.1.1. Material particulado e ozônio

O material particulado, composto por partículas sólidas e líquidas como fuligem e poeira, é classificado em MP_{10} e $MP_{2.5}$, com base no tamanho das partículas. Entre 2019 e 2023, as concentrações anuais de MP_{10} e $MP_{2.5}$ mostraram tendências semelhantes, com $MP_{2.5}$ ultrapassando o PQAr anual em 2021 e estão representadas no *Gráfico 2*. As ultrapassagens diárias de material particulado ocorreram principalmente entre maio e setembro, devido a queimadas, inversões térmicas, baixa ventania e ausência de chuva, além da ressuspensão de poeira do solo causada pelo tráfego intenso de veículos. O ozônio (O_3) é um poluente secundário formado pela interação de óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COV), impactando a saúde humana e a fotossíntese das plantas (Pimenta-Barrios et al., 2014). Embora o ozônio não tenha ultrapassado o PQAr anual entre 2019 e 2023 (*Gráfico 3*), houve frequentes ultrapassagens do PQAr diário, especialmente em meses mais quentes e secos, devido a fatores como altas temperaturas, alta radiação solar e baixa pluviosidade.

Gráfico 02: Concentração média anual de material particulado entre 2019 e 2023, em $\mu m/m^3$. / **Gráfico 03:** Concentração média anual de ozônio entre 2019 e 2023, em $\mu m/m^3$.



Fonte: QUALAR, 2024.

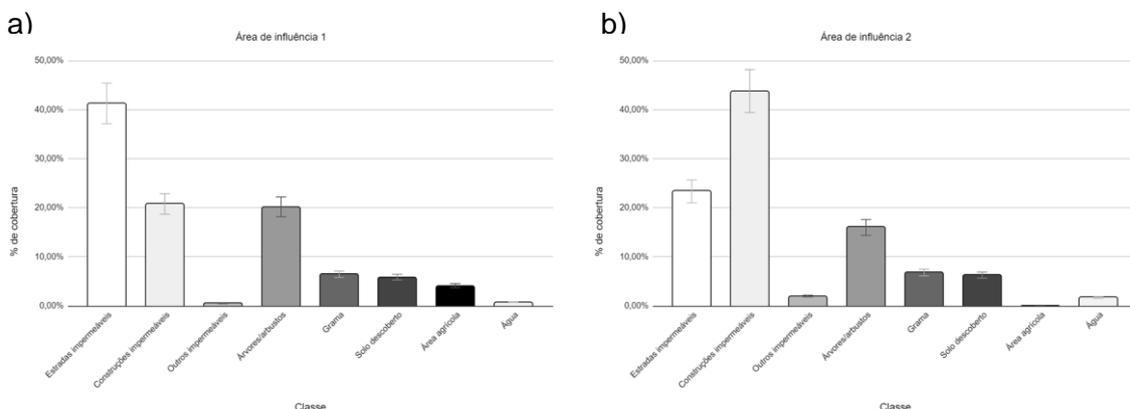
3.2. Uso e ocupação do solo

O município de Ribeirão Preto é majoritariamente agropecuário, com 68,89% da área destinada a essa atividade. Em 2022, a área urbanizada atingiu 21,29%, refletindo o crescimento populacional e expansão urbana, o que reduziu a cobertura vegetal para apenas 8,09%. Nas áreas de influência, há menos agropecuária e mais área urbanizada, com 62,51% de urbanização

e cerca de 27% de vegetação (MapBiomias, 2022). Isso evidencia a escassez de vegetação, especialmente na área de influência 2, e destaca a necessidade de planejamento urbano que incorpore infraestruturas verdes e sustentáveis.

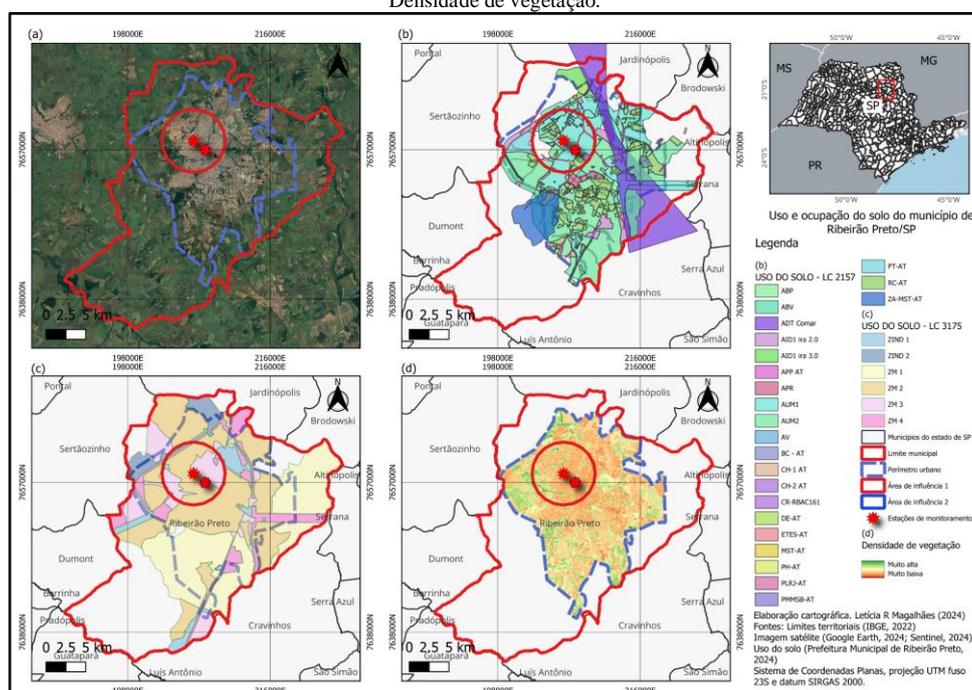
Nas áreas de influência de Ribeirão Preto, observa-se um cenário com menor porcentagem de agropecuária e maior urbanização devido à sua localização na região metropolitana. De acordo com estimativas feitas pelo i-Tree Canopy (Gráfico 04), a área urbana ocupa 62,51% (incluindo estradas, construções e outras superfícies impermeáveis), enquanto a vegetação cobre pouco menos de 27%. Este contraste entre o município de Ribeirão Preto e suas áreas de influência, especialmente na área de influência 2, destaca a escassez de vegetação e a necessidade urgente de um planejamento urbano que integre infraestrutura verde e sustentável.

Gráfico 04: Uso do solo nas áreas de influência. (a) Área de influência 1 e (b) Área de influência 2.



Ao analisar a Figura 3a, observa-se que a maior parte do território do município é composto por áreas agrícolas, porém, ao restringir a análise ao perímetro urbano, pode-se verificar que essa área se constitui majoritariamente por áreas não vegetadas, indicando um elevado grau de urbanização. Ainda, são apresentadas o uso do solo, de acordo com a Prefeitura de Ribeirão Preto, indicando que grande parte da região é classificada como zonas destinadas ao uso industrial ou zonas mistas, contendo tanto residências quanto comércio, segundo as Figuras 3b e 3c.

Figura 03: Comparativo do uso do solo no município de Ribeirão Preto/SP. (a) Google Satellite, (b) Uso do solo - LC 2157, (c) Uso do solo - LC 3175 e (d) Densidade de vegetação.



3.3. Definição das infraestruturas verdes

A análise de infraestruturas verdes (IVs) foi realizada para determinar quais seriam as mais adequadas para o município de Ribeirão Preto, considerando suas características e benefícios. Estudos indicam que florestas urbanas têm alta capacidade de remoção de poluentes como o material particulado (MP_{2,5}), especialmente em áreas montanhosas com alta cobertura vegetal, enquanto em áreas urbanas densas essa capacidade é limitada (Liu et al., 2024). Variáveis meteorológicas, como precipitação e velocidade do vento, também afetam a eficácia da remoção de poluentes, sendo que fatores como o tamanho e a altura das plantas influenciam na deposição de material particulado (Elderbrock et al., 2023; Roldán-Henao et al., 2020, apud Velásquez-Ciro, Eduardo e Cristina, 2021).

Infraestruturas como paredes verdes e painéis verdes (CityTree) demonstraram potencial para a remoção de partículas finas, com eficiência variando conforme o tipo de partícula e as condições de filtração (Donateo et al., 2021). No entanto, telhados verdes, apesar de oferecerem benefícios como redução de escoamento de águas pluviais e mitigação de ilhas de calor, ainda não demonstram remoções significativas de poluentes atmosféricos como NO_2 e $\text{MP}_{2.5}$, e podem até contribuir para a poluição por partículas em determinadas circunstâncias (Irga et al., 2022; Tan e Sia, 2005, apud Yang, Yu e Gong, 2008; Benjamin e Winer, 1998, apud Yang, Yu e Gong, 2008).

A escolha das infraestruturas verdes para Ribeirão Preto foi direcionada para soluções de escala local, como ruas, bairros e praças, devido à predominância de áreas cinzas e limitações de espaço (IPT, 2021). Embora alternativas como painéis verdes e biofiltração botânica mostrem promissoras capacidades de remoção de poluentes, ainda necessitam de mais estudos para validar sua eficácia em larga escala.

Propõe-se a implementação de espaços verdes como florestas urbanas em vias movimentadas e o incentivo à criação de espaços verdes privados, como telhados verdes e jardins verticais. Esses espaços não só melhoraram a qualidade do ar, mas também oferecem benefícios adicionais, como conforto térmico, redução de ruídos e escoamento superficial, valorização visual e recreação (IPT, 2021). Além disso, a implementação de IVs pode reduzir custos relacionados à saúde e energia, contribuindo para a sustentabilidade urbana (Valéria Borges Costemalle, Nunes e Fabrício Alvim Carvalho, 2023; Pimienta-Barrios et al., 2014).

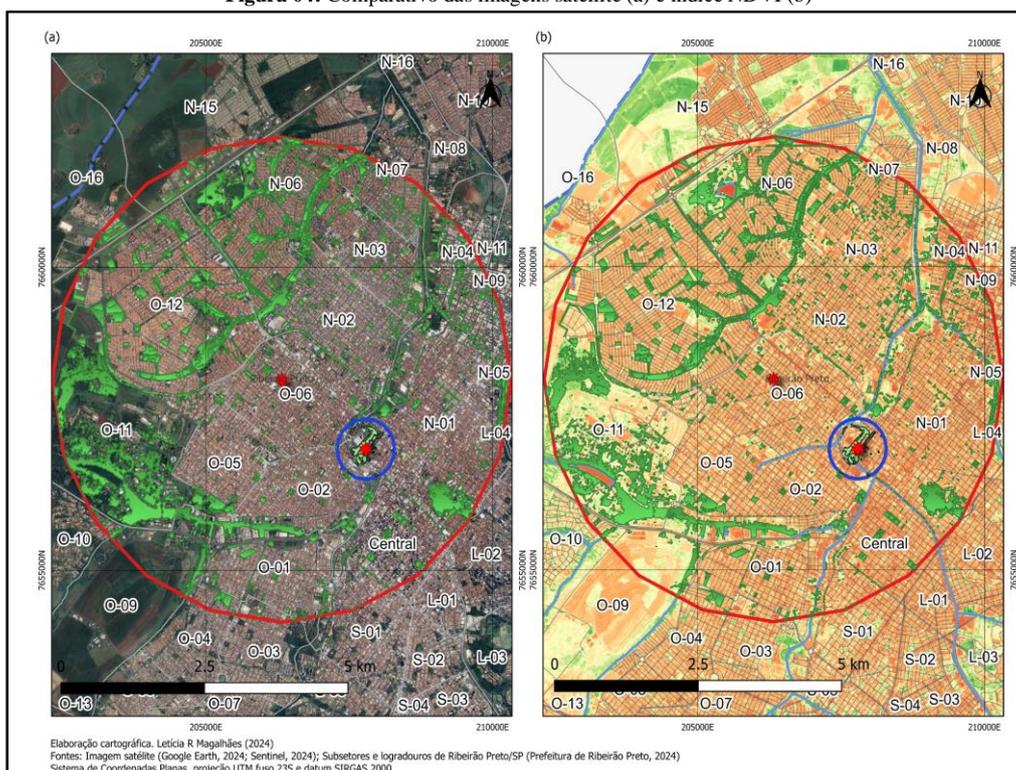
3.4. Alocação das infraestruturas verdes

Na área de influência 1, quase toda a vegetação existente é referente às Áreas de Preservação Permanente (APPs) e proteção ambiental, mas também está presente em torno de algumas das principais rodovias, com isso, as regiões central, nordeste e centro-leste acabam tendo pouca atenção e quase nenhuma vegetação. Além disso, são as áreas que possuem maior concentração de residências e comércio, necessitando de maior cuidado em decorrência do acúmulo de partículas poluentes nessas regiões, podendo afetar a saúde humana.

A AI-2, é composta por uma das rodovias principais e, próxima à ela, uma grande Área de Preservação Permanente também, ambas no centro da região. Assim como na AI-1, as áreas mais necessitadas de vegetação são as constituídas por residências e comércio, porém, na segunda área de influência essas concentrações ficam localizadas nas regiões sul e centro-leste do raio delimitado.

A proposta da aplicação das florestas urbanas é indicada principalmente nos subsetores O-02, O-05, O-06, N-01, N-02, N-03 como mostrado na *Figura 04* onde, os subsetores O-02 e N-01, encontram-se dentro de ambas áreas de influência. Esses subsetores foram identificados como prioritários pela grande falta de vegetação e alta densidade urbana. O emprego dessa IV é recomendado ser feito nas calçadas, de modo que, possam espaços adequados para o plantio de árvores sem prejudicar pedestres e veículos (Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2021), evitando assim, um maior impacto decorrente da turbulência dos veículos e alta velocidade dos ventos das rodovias que causa ressuspensão do material particulado (Zafra-Mejía; Joaquín Suárez-López; Rondón-Quintana, 2021; YIN et al., 2011). Porém, há controvérsias, pois segundo Sillars-Powell; Tallis; Fowler, 2020, quanto menor a distância da infraestrutura verde dos locais de emissão de poluentes, maior será a captura de poluentes pela vegetação

Figura 04: Comparativo das imagens satellite (a) e índice NDVI (b)



4. CONCLUSÃO

Com base na análise dos principais poluentes na região de Ribeirão Preto/SP, fica evidente que as maiores preocupações da cidade são em relação ao material particulado e ozônio, especialmente em dias de baixa ventilação e altas incidências de queimadas. A avaliação do uso do solo revelou a predominância da agropecuária e uma alta taxa de área urbanizada no perímetro urbano do município e isso mostra a necessidade de promover a relação entre as cidades e o planejamento urbano, integrando infraestruturas verdes e sustentáveis.

Com isso, as florestas urbanas se mostraram uma alternativa eficiente para mitigar não só os efeitos da poluição atmosférica mas também se obter um melhor conforto térmico, redução de ruído e do escoamento superficial, valorização visual, recreação, entre outros. Além disso, é importante que haja um incentivo para com os proprietários privados, para que também implementem em suas residências e comércios outras alternativas de infraestruturas verdes, como telhados verdes, jardins verticais e quintais. Para isso, a alocação das IVs deve ser feita nas áreas avaliadas como prioritárias e de forma estratégica, a fim de se ter a maior eficiência possível. É importante ressaltar que, para este estudo, foi proposta uma infraestrutura verde que se encaixa na região, porém, é necessário que se tenha estudos mais aprofundados para avaliar outros fatores, como as melhores espécies caso haja uma implementação.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL. Decreto n. 59.113, de 23 de abril de 2013. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>>. Acesso em: 4 ago. 2024.
- [2] BOTTALICO, F. et al. A spatially-explicit method to assess the dry deposition of air pollution by urban forests in the city of Florence, Italy. *Urban forestry & urban greening*, v. 27, p. 221–234, 1 out. 2017.
- [3] CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade do ar. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>>.
- [4] CETESB– Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de Classificação Expedita da Representatividade Espacial das Estações de Monitoramento da Qualidade do Ar da CETESB no Estado de São Paulo, 2016.
- [5] DANIELA VELÁSQUEZ CIRO; EDUARDO, J.; CRISTINA, I. The removal of PM2.5 by trees in tropical Andean metropolitan areas: an assessment of environmental change scenarios. *Environmental monitoring and assessment*, v. 193, n. 7, 8 jun. 2021.
- [6] DONATEO, A. et al. An evaluation of the performance of a green panel in improving air quality, the case study in a street canyon in Modena, Italy. *Atmospheric environment*, v. 247, p. 118189–118189, 1 fev. 2021.
- [7] ELDERBROCK, E. et al. Modeling black carbon removal by city trees: Implications for urban forest planning. *Urban forestry & urban greening*, v. 86, p. 128013–128013, 1 ago. 2023.
- [8] FARES, S. et al. Testing Removal of Carbon Dioxide, Ozone, and Atmospheric Particles by Urban Parks in Italy. *Environmental science & technology*, v. 54, n. 23, p. 14910–14922, 10 nov. 2020.
- [9] Guia metodológico para implantação de infraestrutura verde – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2021.
- [10] IRGA, P. J. et al. Biosolar green roofs and ambient air pollution in city centres: Mixed results. *Building and Environment*, v. 226, p. 109712–109712, 1 dez. 2022.
- [11] KING, K. L. et al. Differences in magnitude and spatial distribution of urban forest pollution deposition rates, air pollution emissions, and ambient neighborhood air quality in New York City. *Landscape and Urban Planning*, v. 128, p. 14–22, 1 ago. 2014.
- [12] LIU, Y. et al. An Assessment Framework for Mapping the Air Purification Service of vegetation at the Regional Scale. *Forests*, v. 15, n. 2, p. 391–391, 19 fev. 2024.
- [13] MAPBIOMAS. Coleções MapBiomias. MapBiomias, 2024. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>>.
- [14] PETTIT, T. et al. Effective reduction of roadside air pollution with botanical biofiltration. *Journal of hazardous materials*, v. 414, p. 125566–125566, 1 jul. 2021.
- [15] QIN, H. et al. The Effect of Vegetation Enhancement on Particulate Pollution Reduction: CFD Simulations in an Urban Park. *Forests*, v. 10, n. 5, p. 373–373, 28 abr. 2019.
- [16] PIMIENTA-BARRIOS, E. et al. Servicios ambientales de la vegetación en ecosistemas urbanos en el contexto del cambio climático. *Revista mexicana de ciencias forestales*, v. 5, n. 22, p. 28–39, 2014.
- [17] RUSSO, A.; ESCOBEDO, F. J.; ZERBE, S. Quantifying the local-scale ecosystem services provided by urban treed streetscapes in Bolzano, Italy. *AIMS environmental science*, v. 3, n. 1, p. 58–76, 1 jan. 2016.
- [18] SEIWERT, A.; RÖBLER, S. Understanding the term green infrastructure: origins, rationales, semantic content and purposes as well as its relevance for application in spatial planning. *Land Use Policy*, v. 97, 2020.
- [19] SILLARS-POWELL, L.; TALLIS, M. J.; FOWLER, M. Road Verge Vegetation and the Capture of Particulate Matter Air Pollution. *Environments*, v. 7, n. 10, p. 93–93, 20 out. 2020.
- [20] SU, T.-H. et al. Effect of air quality improvement by urban parks on mitigating PM2.5 and its associated heavy metals: A mobile-monitoring field study. *Journal of Environmental Management*, v. 323, p. 116283–116283, 1 dez. 2022.
- [21] UDESHIKA WEERAKKODY et al. Particulate matter pollution capture by leaves of seventeen living wall species with special reference to rail-traffic at a metropolitan station. *Urban forestry & urban greening*, v. 27, p. 173–186, 1 out. 2017.
- [22] UDESHIKA WEERAKKODY et al. Topographical structures in planting design of living walls affect their ability to immobilise traffic-based particulate matter. *Science of the total environment*, v. 660, p. 644–649, 1 abr. 2019.
- [23] VALÉRIA BORGES COSTEMALLE; NUNES, M.; FABRÍCIO ALVIM CARVALHO. An estimation of ecosystem services provided by urban and peri-urban forests: a case study in Juiz de Fora, Brazil. *Ciência Rural*, v. 53, n. 4, 1 jan. 2023.
- [24] ZAFRA-MEJÍA, C.; JOAQUÍN SUÁREZ-LÓPEZ; RONDÓN-QUINTANA, H. Analysis of Particulate Matter Concentration Intercepted by Trees of a Latin-American Megacity. *Forests*, v. 12, n. 6, p. 723–723, 1 jun. 2021.
- [25] YANG, J.; YU, Q.; GONG, P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric environment*, v. 42, n. 31, p. 7266–7273, 1 out. 2008.
- [26] YIN, S. et al. Quantifying air pollution attenuation within urban parks: An experimental approach in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, v. 159, n. 8-9, p. 2155–2163, 1 ago. 2011.