

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL PARTICULADO FINO (MP_{2,5}) E SUA RELAÇÃO COM OS EFEITOS ADVERSOS À SAÚDE HUMANA NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Anderson Eduardo da Silva¹

Júlia Maria Smeck¹

Lincoln Lucilio Romualdo²

Resumo: Este trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica que aborda a composição química e o monitoramento do material particulado fino MP_{2,5} na Região Sul do Brasil. O estudo destaca a relevância das análises químicas ambientais para a identificação das frações tóxicas (como metais pesados, íons inorgânicos e carbono) no MP_{2,5} proveniente, em grande parte, de emissões industriais. O pequeno diâmetro e a toxicidade intrínseca do MP_{2,5} permitem sua profunda penetração no sistema respiratório, sendo associado a diversas doenças pulmonares e cardiovasculares. A metodologia consistiu na síntese crítica de estudos que utilizaram dados de monitoramento (estações fixas, satélites e sensores) para caracterizar a poluição atmosférica regional. Os resultados da revisão indicam concentrações de poluentes superiores aos limites legais e destacam a importância da caracterização química rigorosa para a compreensão da toxicidade. O trabalho conclui reforçando a necessidade de um controle mais eficaz das emissões industriais e da implementação de políticas públicas baseadas em dados ambientais de qualidade, contribuindo para o avanço do conhecimento científico e a proteção da saúde pública.

Palavras-chave: Região Sul; Material Particulado; Monitoramento; Qualidade do Ar; Saúde Pública.

INTRODUÇÃO

O material particulado fino (MP_{2,5}) é reconhecido como um dos principais poluentes atmosféricos responsáveis por impactos expressivos na morbimortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares no Brasil, sobretudo em ambientes urbanos e industrializados (BURALLI, *et al.*, 2025).

¹Instituto de Química – UFCAT: andersoneduardo2011@gmail.com, juliasmeck@gmail.com

² Instituto de Química – UFCAT lincolnromualdo@ufcat.edu.br

Segundo Castelhana (2020), o estado da qualidade do ar é determinado pela interação entre os emissores e os fatores meteorológicos, que podem atuar como dispersores ou concentradores dos poluentes provenientes de fontes fixas, móveis ou naturais. Considerando que as mudanças climáticas estão ocorrendo de forma cada vez mais acelerada, torna-se urgente o monitoramento contínuo da qualidade do ar, de modo a obter dados mais próximos da realidade. Nesse contexto, é fundamental investir na capacitação técnica para garantir o monitoramento adequado, a correta interpretação dos dados e a criação de protocolos voltados à melhoria da qualidade do ar. No que se refere aos riscos à saúde humana, esta pesquisa abordará os efeitos irritantes e tóxicos associados à exposição aos poluentes atmosféricos.

GOUVEIA *et al.*, (2021), reforça em dizer que devido ao diâmetro aerodinâmico reduzido do material particulado (inferior a $2,5\ \mu\text{m}$), essas partículas conseguem atingir as regiões mais profundas do sistema respiratório, ultrapassando a barreira alvéolo-capilar e desencadeando processos inflamatórios e oxidativos sistêmicos, com repercussões sobre o aparelho cardiovascular, metabólico e imunológico. Nos últimos cinco anos, estudos nacionais e internacionais reforçaram que mesmo concentrações de $\text{MP}_{2,5}$ abaixo ou próximas aos limites normativos ainda se associam a risco aumentado de hospitalizações e óbitos, indicando a inexistência de um limiar seguro para exposição prolongada (ASTORI *et al.*, 2024).

A composição química do $\text{MP}_{2,5}$ em cidades brasileiras é formada por uma mistura complexa de matéria orgânica, carbono elementar, íons inorgânicos (sulfato, nitrato e amônio) e metais-traço (elementos metálicos em concentrações muito baixas presentes no ambiente), relacionados principalmente a emissões veiculares, atividades industriais, queima de combustíveis fósseis e, em algumas regiões, queimadas e queima de biomassa (PEREIRA, *et al.*, 2025). Estudos recentes realizados por Hoinaski; Will & Ribeiro (2024) e Pereira *et al.*, (2025), sobre “source apportionment” evidenciam que eventos de poluição intensa costumam resultar da sobreposição de múltiplas fontes antrópicas, gerando um aerossol de elevada ecotoxicidade (estudo dos efeitos tóxicos de substâncias químicas), com potencial carcinogênico e pró-inflamatório.

Na Região Sul do Brasil, trabalhos sobre razões $\text{MP}_{2,5}/\text{MP}_{10}$ e qualidade do ar em cidades com diferentes estruturas econômicas mostram forte influência de atividades industriais, logísticas e portuárias, bem como do transporte pesado, além

de reforçarem o papel da sazonalidade, com concentrações mais altas e dispersão atmosférica prejudicada nos meses de inverno (SANTOS *et al.*, 2025).

Análises de impacto em saúde estimam que o país perde milhões de anos de vida ajustados por produtividade e bilhões de dólares anualmente devido a mortes prematuras associadas à poluição atmosférica, com destaque para o material particulado, sugerindo que a adoção dos novos guias da Organização Mundial da Saúde poderia evitar parcela substancial desse ônus (BURALLI, *et al.*, 2025). Evidências mais recentes também associam concentrações elevadas da fração fina a piores desfechos em doenças infecciosas, como a covid-19, indicando que populações cronicamente expostas ao aerossol fino apresentam maior vulnerabilidade a eventos respiratórios agudos (SILVA *et al.*, 2024; COSTA *et al.*, 2024; BURALLI, *et al.*, (2025).

Diante desse cenário, a revisão bibliográfica proposta, com recorte temporal de até cinco anos, tem como objetivo sintetizar o estado sobre a composição química do MP_{2,5} e sua relação com efeitos adversos à saúde humana no Brasil, com ênfase nas regiões urbanas e no contexto específico da Região Sul, nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

A metodologia adotada contempla a busca sistemática em bases acadêmicas por estudos de periódicos que abordem simultaneamente composição química, monitoramento e desfechos em saúde, priorizando evidências entre 2021 a 2025.

Espera-se, que pela revisão da literatura possamos identificar as frações químicas, os principais perfis de fontes de emissão de poluentes e os grupos populacionais mais vulneráveis, bem como discutir as implicações regulatórias diante da revisão dos padrões de qualidade do ar no Brasil.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Poluição atmosférica e saúde pública no Brasil

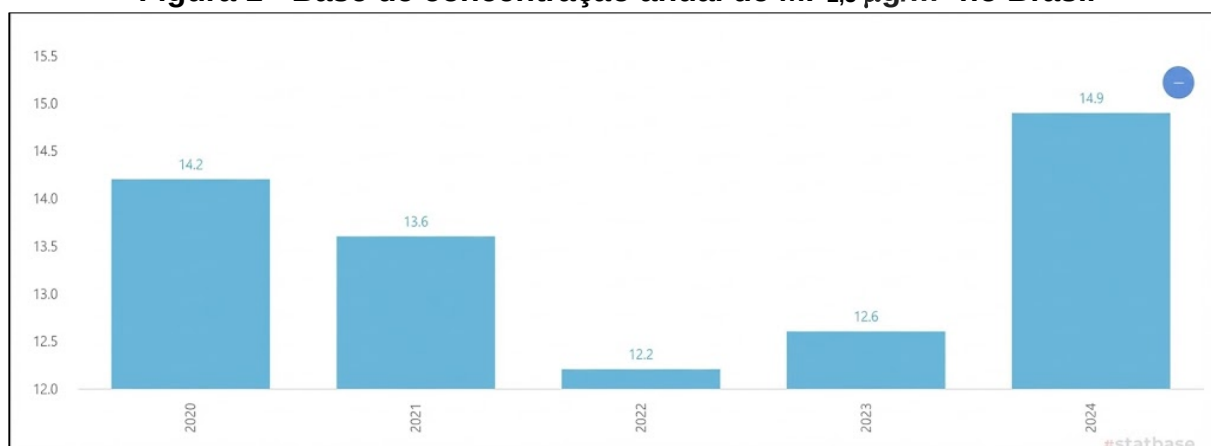
Segundo uma pesquisa realizada por Rodrigues, Santos e Ignotti (2022, *apud* Astori *et al.*, 2024), a poluição atmosférica é considerada um dos maiores desafios ambientais e de saúde pública em escala mundial, sendo responsável, anualmente,

por milhões de mortes prematuras decorrentes de doenças respiratórias, cardiovasculares e neoplásicas.

No contexto brasileiro, a combinação entre crescimento urbano desordenado, frota veicular em expansão, matriz energética ainda dependente de combustíveis fósseis e atividades industriais intensivas em emissões faz com que grandes aglomerados urbanos e polos industriais apresentem níveis preocupantes de poluentes atmosféricos (BARBOZA, *et al.*, 2022).

Entre esses poluentes, o material particulado fino ($MP_{2,5}$) se destaca devido à sua elevada capacidade de penetração no sistema respiratório e ao vínculo consistente com desfechos adversos em saúde, mesmo em concentrações consideradas “moderadas” por padrões regulatórios. Conforme observado em análise de dados nacionais apresentada na figura 1 pode-se notar um elevado aumento da taxa de emissão de $MP_{2,5}$ $\mu g/m^3$ entre os anos de 2020 com 14,2 $\mu g/m^3$ e um aumento significativo do ano de 2023 com uma elevação transacionaria de 18,25% para o ano de 2024, totalizando uma emissão de 14,9 $\mu g/m^3$ (IQAIR, 2025).

Figura 1 - Base de concentração anual de $MP_{2,5}$ $\mu g/m^3$ no Brasil



Fonte: IQAIR, 2025.

Um estudo realizado por Réquia *et al.*, (2024), sobre a avaliação de impacto em saúde evidenciou que a poluição atmosférica permanece como importante fator de risco evitável no Brasil, respondendo por significativa fração das internações e óbitos por doenças do aparelho respiratório e circulatório, entre 2.872.084 registros de óbitos, 2,93% da mortalidade respiratória foram associadas a material particulado.

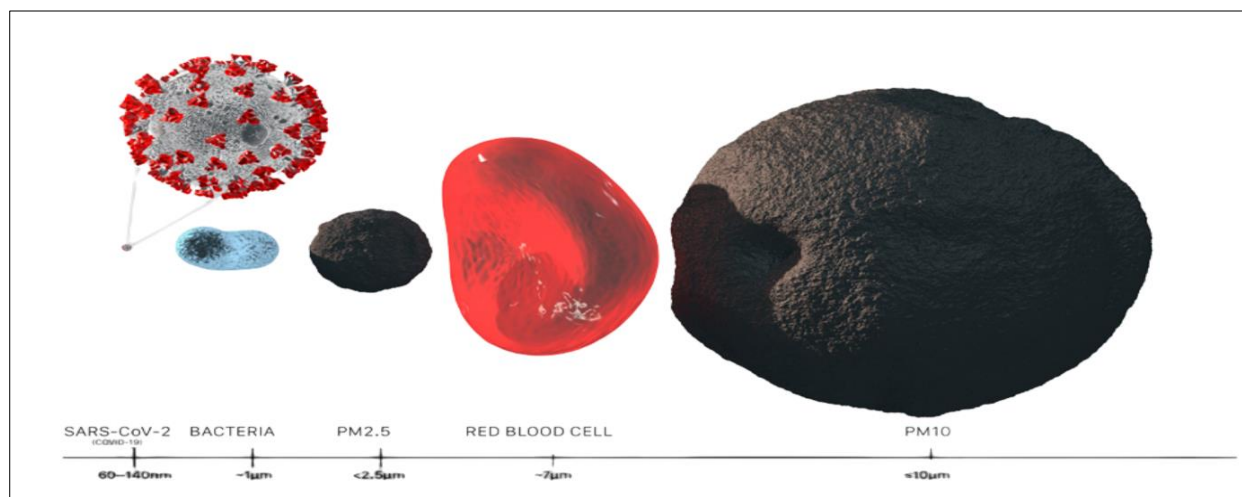
Análises agregadas apontam que o país ainda não alcança plenamente as diretrizes mais rigorosas recomendadas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para a emissão de $MP_{2,5}$, o que implica manutenção de um ônus sanitário e econômico considerável WIKUATS *et al.*, (2023).

Para aprofundar e compreender um pouco mais sobre poluente, precisamos entender as características que compõe esse emissor, uma vez mapeado a sua estrutura pode ser possível adquirir uma visão mais ampla e sistêmica sobre os impactos gerados, tanto em um contexto de mudanças climáticas quanto no aumento da vulnerabilidade de grupos populacionais.

Características do Material Particulado Fino $MP_{2,5}$

O $MP_{2,5}$ é definido como a fração de material particulado com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 micrômetros (figura 2), composta por uma mistura complexa de partículas sólidas e gotas líquidas em suspensão na atmosfera (GOUVEIA *et al.*, 2021).

Figura 2 – Ilustração espacial das dimensões do $MP_{2,5}/MP_{10}$.



Fonte: <https://seetheair.org/2022/05/16/particulate-matter-pm2-5-mega-guide/>

Segundo Santos; Matovani & Souza (2020), essa mesma fração possui um diâmetro pequeno, o grau toxicológico consegue ultrapassar as vias aéreas superiores, atingir os alvéolos pulmonares e, em parte, dirigindo-se para a circulação sanguínea, desencadeando processos inflamatórios sistêmicos, estresse oxidativo, disfunção endotelial e alterações hemodinâmicas. Tais mecanismos fisiopatológicos

estão na base da associação observada entre $MP_{2,5}$ e um amplo espectro de agravos à saúde, que inclui exacerbações de asma e DPOC, infarto agudo do miocárdio, acidente vascular cerebral, arritmias, descompensações de insuficiência cardíaca e aumento da mortalidade por causas respiratórias e cardiovasculares (SANTOS; MATOVANI, SOUZA, 2020).

Castelhana (2020), diz que a composição química do material particulado é um pouco difícil de ser determinado pois variam de acordo com o perfil de fontes e as condições meteorológicas e geográficas de cada região e possuem compostos químicos variados podendo ter diversas combinações (tabela 1), que em sua maioria podem estar presentes em única partícula.

Tabela 1 - Tabela de Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAPs) e Metais

Categoria	Elemento	Fórmula	Características
HAPs	Naftaleno	$C_{10}H_8$	Composto volátil, odor característico (bolinhas de naftalina).
	Acenaftileno	$C_{12}H_8$	HAP de 3 anéis com ligação tripla.
	Acenafteno	$C_{12}H_{10}$	Isômero do acenaftileno, saturado.
	Fluoreno	$C_{13}H_{10}$	Apresenta grupo metileno, usado em síntese de corantes e polímeros.
	Fenantreno	$C_{14}H_{10}$	Isômero do antraceno, menos reativo.
	Antraceno	$C_{14}H_{10}$	HAP de 3 anéis lineares, usado em corantes e materiais luminescentes.
	Fluoranteno	$C_{16}H_{10}$	HAP de 4 anéis, estruturalmente diferente do pireno.
	Pireno	$C_{16}H_{10}$	HAP de 4 anéis condensados, marcador de combustão incompleta.
	Benzo(a)antraceno	$C_{18}H_{12}$	HAP de 4 anéis, considerado cancerígeno (IARC Grupo 2A/2B).
	Criseno	$C_{18}H_{12}$	Encontrado em alcatrão, fuligem e fumaça de cigarro.
HAPs	Benzo(b)fluoranteno	$C_{20}H_{12}$	HAP de 5 anéis, altamente cancerígeno (IARC Grupo 2B).
	Benzo(k)fluoranteno	$C_{20}H_{12}$	Isômero do anterior, cancerígeno.
	Benzo(a)pireno (BaP)	$C_{20}H_{12}$	HAP mais estudado, potente cancerígeno (IARC Grupo 1).
	Dibenzo(a,h)antraceno	$C_{22}H_{14}$	HAP de 6 anéis, altamente cancerígeno (IARC Grupo 2A).
	Benzo(g,h,i)perileno	$C_{22}H_{12}$	HAP de 6 anéis, usado como marcador de emissões veiculares.
	Indeno(1,2,3-cd)pireno	$C_{22}H_{12}$	HAP de 6 anéis, formado em combustões a alta temperatura.

	Alumínio	Al	Leve, resistente à corrosão, amplamente usado em ligas e embalagens.
	Silício	Si	Semicondutor, essencial para eletrônicos e componentes de vidro/cerâmica.
	Fósforo	P	Não-metal, essencial para vida, usado em fertilizantes e detergentes.
	Enxofre	S	Não-metal, encontrado em combustíveis fósseis, causa corrosão e chuva ácida.
	Cloro	Cl	Halogênio, usado em desinfetantes, PVC e solventes.
	Potássio	K	Metal alcalino, essencial em biologia, usado em fertilizantes.
	Titânio	Ti	Metal de transição, leve e resistente, usado em tintas (TiO ₂) e implantes.
Metais Traços	Cromo	Cr	Metal de transição, usado em galvanização (cromagem) e ligas (aço inoxidável).
	Manganês	Mn	Metal de transição, essencial em siderurgia (liga com ferro) e baterias.
	Ferro	Fe	Metal de transição, principal constituinte do aço, essencial para transporte e construção.
	Níquel	Ni	Metal de transição, usado em ligas resistentes à corrosão (aço inox) e baterias.
	Cobre	Cu	Metal de transição, excelente condutor, usado em fiação e tubulações.
	Zinco	Zn	Metal, usado em galvanização (proteção contra ferrugem) e baterias.
	Chumbo	Pb	Metal pesado tóxico, uso historicamente em gasolina, tintas e baterias (em declínio).
	Cálcio	Ca	Metal alcalino-terroso, essencial para ossos e dentes, usado na construção (cal, cimento).

Fonte: Polezer, G. (2015), See The Air (2022).

Estudos recentes de Santos (2023), realizados em especiação em centros urbanos brasileiros, particularmente da cidade de Rio Grande do Sul, indicam que a matéria orgânica e o carbono elementar representam parcela expressiva da massa de

MP_{2,5}, refletindo a contribuição dominante de emissões veiculares e de combustíveis fósseis. Íons sulfato e nitrato derivam em grande parte da oxidação atmosférica de óxidos de enxofre e nitrogênio emitidos por fontes móveis e estacionárias.

Segundo Hoinaski; Will & Ribeiro (2024), os metais traços presentes na pequena fração fina costumam estar associados a atividades industriais, como desgaste de freios e pneus, também na ressuspensão de poeira urbana enriquecida por tráfego e, em alguns cenários, processos de mineração e metalurgia. A presença de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) como o benzo(a)pireno e seus isômeros é particularmente preocupante, tendo em vista seu elevado potencial carcinogênico e sua prevalência em áreas com intenso tráfego veicular (PEREIRA, *et al.*, 2025).

Evidências Epidemiológicas Recentes no Brasil

Os estudos epidemiológicos mais recentes confirmam uma relação causal robusta entre a exposição ao material particulado 2,5 micrômetros e diversos desfechos adversos em saúde (GOUVEIA *et al.*, 2021). Segundo levantamento realizado pela Sociedade Brasileira de Pediatria (2024), doenças associadas à poluição do ar matam cerca de 465 crianças menores de cinco anos por dia no Brasil, representando um impacto desproporcional em populações vulneráveis.

De acordo com o Observatório da Saúde Pública (2025), foram registradas mais de 159 mil internações por doenças pulmonares e 52 mil por asma em todos os municípios do Brasil.

No campo da saúde, Buralli, *et al.*, (2025), revisões e estudos epidemiológicos foram publicados no cenário pós pandemia decorrente do covid-19 entre o período de 2019 a 2021 apontando a relação consistente entre a exposição ao poluente e o aumento de internações e óbitos por doenças respiratórias e cardiovasculares no Brasil.

A vulnerabilidade diferenciada de grupos populacionais é marcante, populações idosas, crianças, gestantes e indivíduos com condições pré-existent (asma, DPOC, doenças cardiovasculares, diabetes) apresentam risco aumentado de hospitalizações e morte quando expostos a níveis elevados de MP_{2,5} (DOMINSKI *et al.*, 2021).

As disparidades socioeconômicas amplificam esse risco, uma vez que populações de menor renda tendem a residir em áreas com maior concentração de fontes poluidoras (tráfego intenso, proximidade de indústrias) e com menor acesso a serviços de saúde preventiva e curativa (BARBOZA *et al.*, 2022).

No que tange especificamente aos desfechos cardiovasculares, Gouveia *et al.*, (2021), documentaram associações significativas entre exposição curta a $MP_{2,5}$ e mortalidade cardiovascular em 337 cidades latino-americanas, incluindo brasileiras. Em contexto de queimadas sazonais, concentrações elevadas da fração fina foram associadas a picos de admissões por infarto agudo do miocárdio, arritmias e descompensação de insuficiência cardíaca (PEREIRA, *et al.*, 2025).

O mecanismo subjacente envolve translocação de partículas ultrafinas para a circulação sistêmica, indução de inflamação sistêmica, estresse oxidativo e disfunção endotelial (SANTOS; MANTOVANI; SOUZA, 2020).

Particularidades da Região Sul e Lacunas de Conhecimento

Silva *et al.*, (2020), diz que a região Sul do Brasil apresenta características únicas que demandam atenção específica. Os três estados que compõem a região (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) combinam uma base industrial significativa (química, celulose, metalurgia, refinarias) com intensa atividade portuária e logística e uma matriz de transporte dependente de combustíveis fósseis. Simultaneamente, a região está sujeita a influências sazonais marcantes, com períodos de inverno caracterizados por condições meteorológicas estáveis (inversão térmica) que favorecem o acúmulo de poluentes (SILVA, 2020).

Santos *et al.*, (2025), demonstra que razões de $MP_{2,5}/MP_{10}$ variam significativamente entre cidades da Região Sul conforme suas atividades econômicas predominantes. Por exemplo, o estado do Rio Grande Sul, possui uma predominância de forte presença em indústrias de fertilizantes e operações portuárias, acarretando em perfis de poluição distintos como a cidade de Pelotas (comércio e serviços industriais), Candiota (atividade mineradora e termelétrica) e Herval (agronegócios). Essa diversidade de fontes emissoras implica em composições

químicas heterogêneas do poluente, requerendo estratégias de monitoramento e controle específicas para cada localidade (SANTOS *et al.*, 2024).

Apesar dessa relevância, lacunas significativas persistem no conhecimento sobre a região Sul do País. De acordo com o Relatório de Monitoramento da Qualidade do Ar do Brasil (2024), enquanto a Região Sudeste concentra 76% das estações de monitoramento do país, a Região Sul possui apenas 13%. Esta limitação compromete a capacidade de caracterizar adequadamente a poluição regional, identificar as fontes com precisão e avaliar os efeitos à saúde com a robustez necessária. No Rio Grande do Sul, temos apenas 13 estações de monitoramento automático que estão operacionais, cobrindo de forma limitada um estado de grande extensão territorial com realidades econômicas distintas (SANTOS, 2023; VORMITTAG *et al.*, 2021).

Estudos de especiação química (determinação da composição exata do $MP_{2,5}$) ainda são escassos na região Sul, limitando-se geralmente ao monitoramento de massa total. Hoinaski; Will & Ribeiro (2024), diz que essa carência restringe a capacidade de realizar "source apportionment" (apuração de contribuição de fontes) com precisão e de orientar regulação ambiental baseada em evidências sólidas. Por fim, Santos *et al.*, (2024), sugere que as investigações das matérias orgânicas devem ser prospectivas, ou seja, todos os cenários possíveis devem ser analisados quando se diz respeito aos efeitos à saúde em cidade brasileiras, considerando suas exposições particulares e vulnerabilidades, ainda mais quando se trata da região Sul que possuem poucos pontos de monitoramento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se de uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo com elementos sistemáticos, voltada a sintetizar evidências recentes sobre a composição química do material particulado fino ($MP_{2,5}$) e seus efeitos adversos à saúde humana no Brasil, com ênfase na Região Sul. Para a busca de periódicos adotou-se como recorte temporal principal o período entre janeiro de 2020 à dezembro de 2025, de forma a contemplar a produção científica mais atual, incluindo estudos publicados durante e

após a pandemia de covid-19, período em que a temática da poluição atmosférica ganhou destaque em âmbito global.

A busca de artigos foi realizada em bases de dados acadêmicas amplamente utilizadas em saúde e ciências ambientais: Capes, SciELO, PubMed/MEDLINE, LILACS, Google Acadêmico e repositórios institucionais nacionais, além da consulta pontual a periódicos internacionais de acesso aberto com pesquisas sobre qualidade do ar no Brasil. Utilizaram-se combinações de descritores em português e inglês, tais como "MP_{2.5}" AND "material particulado fino" AND "região sul" AND "qualidade do ar" AND "saúde pública" AND "epidemiologia" AND "Brasil" e "air pollution" AND "MP_{2.5}" AND "fine particulate matter" AND "southern region" AND "air quality" AND "public health" AND "epidemiology" AND "Brazil", e para o critério de exclusão o conectivo "NOT", utilizando associações por operadores booleanos (SANTOS; CAMOSSÍ; AMORIM, 2023), de forma a abranger tanto estudos de composição química quanto análises epidemiológicas.

Foram incluídos artigos originais, revisões, estudos de avaliação de impacto em saúde e trabalhos metodológicos que abordassem: (i) composição química ou especiação de MP_{2.5} em cidades brasileiras com foco predominante na Região Sul do Brasil; (ii) análise de fontes e perfis de emissão relacionados ao MP_{2.5}; (iii) associações entre exposição ao MP_{2.5} e desfechos em saúde (morbidade, mortalidade, agravos infecciosos); e/ou (iv) desenvolvimento e validação de técnicas de monitoramento e modelagem de MP_{2.5} aplicadas ao contexto nacional. Foram priorizados estudos com dados posteriores a 2020; trabalhos anteriores foram utilizados apenas para contextualização histórica ou metodológica, quando indispensáveis.

Foram excluídos artigos sem disponibilidade de texto completo, estudos focados exclusivamente em outros poluentes atmosféricos sem análise da fração fina do material particulado e publicações com recorte geográfico ou metodológico incompatível com os objetivos desta revisão. A seleção e leitura crítica dos estudos permitiram organizar os achados em eixos temáticos (composição e fontes, monitoramento e exposição, impactos em saúde e lacunas/agenda futura), buscando a estruturação do conteúdo de forma lógica e coerente, visando atender aos objetivos deste trabalho.

RESULTADOS

A busca por referências teóricas catalogou 45 artigos encontrados entre o período de 2020 a 2025, dos quais foram selecionados periódicos sobre emissões priorizando artigos da Região Sul, atendendo aos objetivos deste trabalho. Os estudos abrangem desde investigações de laboratório sobre composição química até análises epidemiológicas de larga escala e relatórios governamentais de monitoramento.

Fontes de $MP_{2,5}$ na Região Sul

O material particulado fino ($MP_{2,5}$) tem se consolidado como um dos principais indicadores de poluição atmosférica e riscos à saúde nas cidades brasileiras. Sua composição química revela a complexidade das fontes emissoras e dos processos atmosféricos que determinam sua variabilidade espacial e temporal. Em centros urbanos como Rio Grande-RS, Florianópolis-SC, Curitiba-PR e Londrina-PR, em estudos apontados por Santos *et al.*, (2025), Pereira *et al.*, (2025), Hoinaski; Will & Ribeiro (2024); Santos, (2023) e Santos *et al.*, (2020), descrevem que a matéria orgânica e o carbono elementar representam frações significativas da massa particulada, refletindo a predominância das emissões veiculares e a influência de combustíveis fósseis, sobretudo o diesel.

Segundo relatório da Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul (FEPAM, 2025), em 2024 as concentrações médias anuais de $MP_{2,5}$ na Região Metropolitana de Porto Alegre oscilaram entre 10 a 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando o limite recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para média anual. Nas regiões de Rio Grande e Caxias do Sul, igualmente afetadas por atividades industriais e tráfego intenso, os padrões permaneceram acima dos limites seguros. Análises de "source apportionment" realizadas por Hoinaski; Will & Ribeiro (2024), indicam que emissões veiculares respondem por aproximadamente 35 a 45% da massa de $MP_{2,5}$, seguidas por ressuspensão de poeira urbana (25 a 30%), contribuições industriais (15 a 20%) e queimadas/queima de biomassa (10 a 15%), com variações sazonais e espaciais significativas.

A composição iônica caracteriza-se pela prevalência de sulfato (proveniente da oxidação catalítica de SO_2) e nitrato (de NO_x), ambos formados em reações

secundárias na atmosfera. Metais-traço como ferro, zinco, chumbo e cobre refletem contribuições de tráfego (desgaste de freios, pneus e corrosão de componentes) e processos industriais. A presença de elevadas concentrações de benzo(a)pireno (BaP) em cidades com tráfego intenso sinaliza preocupação particular com potencial carcinogênico. Silva *et al.*, (2011), em estudo sobre queimada de palha de cana-de-açúcar, documentaram concentrações medianas de HAPs significativamente elevadas em períodos de queimada ($1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de BaP equivalente), demonstrando o impacto de fontes sazonais características de regiões agroindustriais.

Monitoramento e Exposição Ambiental na Região Sul

O panorama do monitoramento na Região Sul reflete desigualdades nacionais. Enquanto o estado de São Paulo opera com aproximadamente 90 estações automáticas de monitoramento ativas, a Região Sul, apesar de sua importância econômica e ambiental, dispõe de apenas 29 estações ativas (VORMITTAG *et al.*, 2021). As estações de monitoramento da qualidade do ar presentes nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul apresentam cobertura intermediária, mas ainda insuficiente para caracterizar adequadamente suas respectivas regiões (BRASIL, 2024). Esta limitação contrasta com a demanda, visto que em 2024, longos períodos de seca agravaram a dispersão de fumaça por grandes áreas do país, levando diversos municípios sulistas a ultrapassar o limite diário de $\text{MP}_{2,5}$ recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025).

Práticas metodológicas, predominam no Brasil com estações automáticas (80 a 85% do total) que medem massa total de poluentes por gravimetria, menos de 20% medem $2,5 \mu\text{m}$, permitindo apenas caracterização limitada (INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA KLIMAPOLIS, 2025). Estudos de especiação química utilizando técnicas como cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF) e análise de componentes principais (PCA), ainda são realizados predominantemente em contexto de pesquisa acadêmica e não de forma rotineira pelas agências ambientais regionais, essa carência compromete a capacidade de orientar políticas de controle de fontes específicas com base em dados sólidos (FARIAS, 2023).

Impactos em Saúde e Vulnerabilidades Populacionais

As análises epidemiológicas evidenciam impactos substanciais na saúde populacional. De acordo com o Ministério da Saúde (2025), a exposição ao $MP_{2,5}$ foi responsável por 95 mil óbitos no Brasil em 2024, com distribuição heterogênea conforme regiões, sendo a Região Sudeste particularmente afetada pela concentração urbana e industrial, seguida pela Região Sul. Ao considerar anos de vida produtiva perdidos (DALY) e custos econômicos associados, Wen *et al.*, (2024), estimam que entre 2000 e 2019, o Brasil perdeu mais de 9 milhões de anos de vida ajustados pela produtividade e USD 268,05 bilhões devido à morte prematura por exposição a fração fina do material particulado.

Doenças respiratórias crônicas (asma, DPOC) são as mais frequentemente associadas, com evidências de exacerbação em períodos de pico de poluição (CASCIO, 2018 *apud* URRUTIA-PEREIRA, *et al.*, 2021).

Impactos cardiovasculares, incluindo infarto agudo do miocárdio e acidente vascular cerebral, são observados não apenas em exposição crônica, mas também em resposta a picos agudos de poluição, especialmente em idosos (GOUVEIA *et al.*, 2021). Dados do SIM-DATASUS revelam que em 2022 foram registrados 176.073 óbitos por doenças do aparelho respiratório no Brasil, representando taxa de mortalidade de 87 por 100 mil habitantes (OBSERVATÓRIO DA SAÚDE PÚBLICA, 2025). Nas capitais da Região Sul, embora com taxas inferiores à do Rio de Janeiro, a tendência permanece preocupante e em ascensão conforme aumenta a exposição a poluentes (OLIVEIRA; MOREIRA & CORDEIRO, 2022).

Populações vulneráveis (crianças menores de 5 anos, idosos acima de 65 anos, gestantes e indivíduos com doenças pré-existentes), apresentam suscetibilidade aumentada. De acordo com a Sociedade Brasileira de Pediatria (2024), gestantes expostas a elevadas concentrações de $MP_{2,5}$ apresentam maior probabilidade de parto prematuro e recém-nascidos com baixo peso, com implicações sobre o desenvolvimento neuropsicomotor e risco aumentado de asma e doenças pulmonares na infância. Essa vulnerabilidade é amplificada em populações de menor renda, nas quais a exposição ambiental é maior e o acesso a cuidados preventivos e curativos é reduzido.

CONCLUSÕES

A revisão dos estudos publicados nos últimos cinco anos evidencia que o material particulado fino ($MP_{2,5}$) permanece como um dos principais determinantes ambientais de agravos à saúde no Brasil, especialmente em contextos urbanos e industrializados. A composição química do $MP_{2,5}$, marcada pela presença de matéria orgânica, carbono elementar, íons inorgânicos e metais-traço associados a fontes veiculares, industriais e de queima de biomassa, confere ao aerossol um elevado potencial toxicológico, com capacidade de induzir inflamação, estresse oxidativo e desregulação cardiovascular e imunológica. Na Região Sul, a coexistência de múltiplos perfis de fontes e condições meteorológicas que favorecem episódios de acúmulo de poluentes, sobretudo no inverno, reforça a relevância de avaliações regionais específicas.

Conclui-se que o enfrentamento do problema do $MP_{2,5}$ no Brasil, e em particular nos estados da Região Sul do país, exigem uma combinação de ações: revisão e fortalecimento da regulação da qualidade do ar; políticas intersetoriais voltadas ao controle de emissões veiculares, industriais e de queima de biomassa; expansão e qualificação do monitoramento; e incentivo à pesquisa aplicada que considere as especificidades regionais e a perspectiva da justiça ambiental. Ao sintetizar as evidências recentes, este trabalho busca contribuir para a consolidação de uma agenda de saúde ambiental que reconheça o $MP_{2,5}$ como prioridade de intervenção e para a formulação de estratégias que protejam, de forma mais equitativa, a população brasileira exposta ao material particulado fino.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, de forma especial, à Universidade Federal de Catalão (UFCAT), instituição que nos acolheu e proporcionou não apenas a formação acadêmica, mas também a construção de valores humanos, críticos e sociais ao longo de nossa trajetória. Reconhecemos o papel fundamental da universidade pública, gratuita e de qualidade na transformação de nossas vidas e na ampliação de oportunidades para ingressar no ensino superior.

Nossa gratidão se estende ao corpo docente da UFCAT, pela dedicação, compromisso com o ensino, incentivo à pesquisa e apoio nas dificuldades encontradas durante o percurso acadêmico. Cada orientação, aula, conversa e feedback contribuíram diretamente para o amadurecimento deste trabalho e para a construção de nosso olhar científico e crítico sobre a realidade.

Por fim, deixamos registrado nosso reconhecimento a todos os colegas e demais membros da comunidade acadêmica da UFCAT, com quem compartilhamos desafios, descobertas, aprendizados e conquistas. A convivência nesse espaço coletivo de ensino, pesquisa e extensão foi decisiva para que este trabalho se tornasse possível e para que saíssemos desta universidade mais preparados, responsáveis e comprometidos com a sociedade.

REFERÊNCIAS

- ASTORI, V. *et al.* Adverse effects of atmospheric pollution on public health in Brazil: an integrative review. **SciELO Preprints**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.9284>. Acesso em: 16 out. 2025.
- BARBOZA, Eliane P. *et al.* The impact of urban environmental exposures on health: an assessment of the attributable mortality burden in Sao Paulo city, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 816, 151498, 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35351512/>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- BURALLI, R. J. *et al.* Air pollution, health and regulations in Brazil: are we progressing?. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 41, n. 3, e00172924, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.org/article/csp/2025.v41n3/e00172924/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Relatório anual de acompanhamento da qualidade do ar: 2024**. Brasília, DF: MMA, 2025. 63 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/qualidade-ambiental-e-meio-ambiente-urbano/relatorio-anual-de-acompanhamento-da-qualidade-do-ar-2024.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2025.
- CASCIO WE. **Wildland fire smoke and human health**. Sci Total Environ. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971733512X?via%3Dihub>. Acesso em: 14 out. 2025.
- CASTELHANO, Francisco Jablinski. **Clima urbano** [recurso eletrônico]. Curitiba: Contentus, 2020. ISBN 978-65-5745-049-9. Disponível em: <https://site-hmg.bvirtual.com.br/NossoAcervo/Publicacao/clima-urbano-182532>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- COSTA, G. *et al.* **Spatialized PM2.5 during COVID-19 pandemic in Brazil's most populous southern city: implications for post-pandemic era**. Environmental Geochemistry and Health, PubMed, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38225482>. Acesso em: 16 out. 2025.
- DOMINSKI, F. H. *et al.* **Effects of air pollution on health: a mapping review of systematic reviews and meta-analyses**. Environmental Research, v. 201, 111487, 2021. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111487. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34116013/>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- FARIAS, Renata Almeida. **Composição físico-química de pólen apícola de diferentes biomas**. 2023. 58 f. Dissertação (Mestrado em Química Aplicada) – Programa de Pós-Graduação em Química Aplicada, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2023. Disponível em: <https://tede.unicentro.br/jspui/bitstream/jspui/2023/2/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Renata%20A.%20Farias.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2025.
- FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. **Relatório da qualidade do ar 2024**. Porto Alegre: FEPAM, 2025. Disponível em: <https://www.fepam.rs.gov.br/upload/arquivos/202507/18133945-relatorio-da-qualidade-do-ar-2024.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2025

- GOUVEIA, N. *et al.* Ambient fine particulate matter in Latin American cities: levels, population exposure, and associated urban factors. **Science of the Total Environment**, v. 772, 145035, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145035>. Acesso em: 14 out. 2025.
- HOINASKI, L.; WILL, R.; RIBEIRO, C. B. Brazilian Atmospheric Inventories – BRAIN: a comprehensive database of air quality in Brazil. **Earth System Science Data**, v. 16, p. 2385–2405, 2024. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/16/2385/2024>. Acesso em: 16 out. 2025.
- INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA KLIMAPOLIS. **Brasil amplia monitoramento de PM2,5 com campanha apoiada pelo INCT Klimapolis**. *INCT Klimapolis*, 09 set. 2025. Disponível em: <https://inctklimapolis.org/2025/09/09/brasil-amplia-monitoramento-de-mp25-com-campanha-apoiada-pelo-inct-klimapolis/>. Acesso em: 04 jan. 2026.
- IQAIR. **Air pollution: Brazil – yearly data, chart and table**. Statbase, 2025. Disponível em: <https://statbase.org/data/bra-air-pollution/>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Vigilância em Saúde de Populações Expostas a Poluentes Atmosféricos** - Vigiar. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/saude-ambiental/vigiar>. Acesso em: 29 dez. 2025.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Painel Vigiar: Poluição Atmosférica e Saúde Humana**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2025. Disponível em: https://www.saude.df.gov.br/documents/37101/0/Boletim_Vigiar+n%C2%BA+8+-+2025.pdf/c8b1a830-556b-23e4-4712-a610904ce94b?t=1759834195203. Acesso em: 30 dez. 2025.
- OBSERVATÓRIO DA SAÚDE PÚBLICA. Poluição e doenças respiratórias: impacto na saúde brasileira. **Biblioteca Observatório da Saúde Pública**, 30 jul. 2025. Disponível em: <https://biblioteca.observatoriosaudepublica.com.br/blog/poluicao-e-doencas-respiratorias-impacto-na-saude-brasileira/>. Acesso em: 29 out. 2025.
- OLIVEIRA, N. MOREIRA, R. CORDEIRO, R. Mortalidade por doença respiratória crônica no Brasil: tendência temporal e projeções. *Revista de Saúde Pública*, São Paulo, v. 56, 52, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.org/article/rsp/2022.v56/52/pt/>. Acesso em: 04 dec. 2025.
- PEREIRA, G. M. *et al.* Source apportionment and ecotoxicity of PM2.5 pollution events in a major Southern Hemisphere megacity: influence of a biofuel-impacted fleet and biomass burning. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 25, p. 4587–4616, 2025. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/25/4587/2025/>. Acesso em: 16 out. 2025.
- REQUIA, W. J. *et al.* **Short-term air pollution exposure and mortality in Brazil: investigating susceptible population groups**. *Environmental Pollution*, v. 340, parte 2, 122797, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749123017992#preview-section-snippets>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- RODRIGUES, P. C. O.; SANTOS, E. S.; HACON, S. S.; IGNOTTI, E. Risk factors in cardiovascular disease mortality associated with high exposure to vehicular

- traffic. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 20, n. 3, p. 423-434, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbepid/a/JZ6zNDJNCbg9q8zyQH869kv/?lang=en>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- SANTOS, J. K. *et al.* **PM_{2.5}/PM₁₀ ratios in southernmost Brazilian cities and its relation with economic contexts and meteorological factors**. Environmental Monitoring and Assessment, PubMed, 2025. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39853429>. Acesso em: 16 out. 2025.
- SANTOS, J. K. **Níveis e razão do material particulado (PM_{2,5} e PM₁₀) em quatro cidades do Rio Grande do Sul com diferentes atividades econômicas predominantes**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, RS, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpel.edu.br/handle/prefix/14539>. Acesso em: 27 dez. 2025.
- SANTOS, J. K. *et al.* **PM_{2.5}/PM₁₀ ratios in southernmost Brazilian cities and its relation with economic contexts and meteorological factors**. Environmental Monitoring and Assessment, 2025. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39853429>. Acesso em: 16 out. 2025.
- SANTOS, D. R. F.; MANTOVANI, I. S.; SOUZA, J.; SOLCI, M. C. **Sazonalidade do material particulado fino e black carbon no ar ambiente de Londrina/Paraná** / Seasonality of fine particulate material and black carbon in the ambient air of Londrina/Paraná. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 10, p. 84069–84086, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n10-736. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/19212>. Acesso em: 27 dec. 2025.
- SANTOS, J. A. *et al.* Performance of fine particulate matter data on air quality in an epidemiological study in Salvador, Brazil. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 27, e240068, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11654642/>. Acesso em: 03 dec. 2025.
- SANTOS, J. F. CAMOSSÍ, G. AMORIM, C. J. R.. **Expressões de busca e o uso de diferentes operadores avançados de pesquisa em um mecanismo de busca**. *Transinformação*, Campinas, v. 35, e230038, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/tl/a/GbtmKqRhRmyWHHKBxSQTrkG/?lang=pt>. Acesso em: 16 dez. 2025.
- SILVA J. F. M. R. *et al.*, Air quality in cities of the extreme south of Brazil. **Ecotoxicology and Environmental Contamination**, v. 15, n. 1, p. 61-68, 2020. DOI: 10.5132/eec.2020.01.08. Disponível em: <https://ecotoxbrasil.org.br/wp-content/uploads/2023/09/8-2.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2026.
- SILVA, F. S. **Influência da queima da palha de cana de açúcar na constituição do material particulado atmosférico (MP_{2,5} e MP₁₀) e as suas implicações potenciais sobre a saúde humana**. 2011. Tese (Doutorado em Química) -- Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, SP, 2011. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/105693/1/silva_fs_dr_araiq.pdf. Acesso em: 16 dez. 2025.

- SILVA, T. N. *et al.* **Air pollution and Covid-19 mortality in Brazil**. Brasília: Universidade de Brasília, 2024.
Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/73366>. Acesso em: 16 out. 2025.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE PEDIATRIA. **No Brasil, doenças associadas à poluição do ar matam cerca de 465 crianças menores de cinco anos por dia**. 2024. Disponível em: <https://www.sbp.com.br/imprensa/detalhe/nid/no-brasil-doencas-associadas-a-poluicao-do-ar-matam-cerca-de-465-criancas-menores-de-cinco-anos-por-dia/>. Acesso em: 07 out. 2025.
- URRUTIA-PEREIRA, M. *et al.*, Impact of exposure to smoke from biomass burning in the Amazon rain forest on human health. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 47, n. 5, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbpneu/a/ymg4hVTN8ftSgwKVL3YC7Zt/?lang=pt>. Acesso em: 16 dez. 2025.
- VORMITTAG, E. DA M. P. A. DE A. *et al.* **Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil**. Estudos Avançados, v. 35, n. 102, p. 7–30, maio 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/fbCFjRbBRhf4M5F6xQVrbfR/?lang=pt>. Acesso em: 30 dez. 2025.
- WEN, B. *et al.* **Ambient PM2.5 and productivity-adjusted life years lost in Brazil: a national population-based study**. **Journal of Hazardous Materials**, v. 467, 133676, 2024. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133676. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389424002553>. Acesso em: 30 dez. 2025.
- WIKUATS, Caroline Fernanda Hei *et al.* Health risk assessment of exposure to air pollutants exceeding the new WHO air quality guidelines (AQGs) in São Paulo, Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 9, 5707, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10177979/>. Acesso em: 22 dez. 2025.