

Análise da Distribuição Espaço-Temporal de PM 2.5 no Brasil Utilizando Dados de Sensoriamento Remoto

Júlia S. Gayotto¹, Fabrício G. M. de Carvalho¹, Valdivino A. de Santiago Júnior¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Avenida dos Astronautas, 1.758 – Jardim da Granja – São José dos Campos –
SP – Brasil

{fabricio.galende, valdivino.santiago}@inpe.br, juliagayotto@gmail.com

Abstract. Air pollution represents a major environmental and public health concern, with 2.5 μ m particulate matter (PM2.5) being one of the pollutants most strongly associated with adverse health effects. In this study, a spatiotemporal analysis of PM2.5 concentrations across Brazil was conducted. Concentration data were aggregated at different territorial levels and compared with wildfire hotspot data and population estimates. The results revealed regional and seasonal patterns, with higher concentrations during periods of increased wildfire activity. Additionally, the analysis identified populations potentially exposed to elevated levels of air pollution, demonstrating the potential of the proposed methodology to support the development of public policies.

Resumo. A poluição atmosférica representa um importante problema ambiental e de saúde, sendo o material particulado 2.5 μ m (PM2.5) um dos poluentes mais associados a poluição. Neste trabalho, foi realizada uma análise da distribuição espaço-temporal das concentrações de PM2.5 no Brasil. As concentrações foram agregadas em diferentes níveis territoriais e comparadas com focos de queimadas e estimativas populacionais. Os resultados permitiram identificar padrões regionais e sazonais, com maiores concentrações observadas durante os períodos de maior ocorrência de queimadas, além de demonstrar populações potencialmente exposta a níveis elevados de poluição, o que mostrou o potencial da metodologia para formulação de políticas públicas.

1. Introdução

A poluição atmosférica representa um dos principais desafios ambientais e de saúde pública, estando associada a impactos significativos na qualidade de vida da população e nos ecossistemas [Xing et al. 2016]. Além de seus efeitos sobre a saúde humana, a poluição do ar também está relacionada ao crescimento industrial e ao desenvolvimento econômico, atividades que, embora sejam fundamentais para o progresso das sociedades, intensificam a emissão de poluentes quando não acompanhadas de práticas sustentáveis. Nesse contexto, o monitoramento da qualidade do ar torna-se uma ferramenta de extrema relevância para a formulação de políticas públicas e ações de mitigação de impactos [World Health Organization 2025].

A qualidade do ar é determinada com base na mensuração e análise de indicadores ambientais, como poluentes atmosféricos [CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo 2025]. O material particulado 2.5 μ m (PM2.5), um dos principais indicadores, trata-se de uma mistura

complexa de partículas sólidas e/ou líquidas suspensas no ar, presentes na forma de aerossóis, fumaça, poeira, entre outros. Essas partículas possuem diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 micrômetros (μm) e são originadas por fontes como incêndios florestais, reações químicas naturais na atmosfera, erupções vulcânicas, queima de combustíveis fósseis, biomassa, emissões veiculares e industriais, reações químicas secundárias que as geram a partir de certos gases, entre outros [CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo 2025, World Health Organization 2021].

Embora ao longo do território brasileiro existam poucos estações de monitoramento de PM_{2.5}, com o avanço do sensoriamento remoto, tornou-se possível a estimação da concentração de poluentes em grandes áreas, mesmo na ausência de estações de monitoramento [Van Donkelaar et al. 2010]. Nesse contexto, a realização de análises com os dados disponibilizados por satélite mostra-se de grande interesse de órgãos governamentais de saúde e meio ambiente [Ministério da Saúde 2026], visto que torna-se possível a efetivação de análises e tomadas de decisões sobre qualidade do ar e saúde em escala nacional, não sendo limitadas a locais com estações.

Com isso em mente, este estudo tem como objetivo analisar a distribuição espaço-temporal das concentrações de PM_{2.5} no território brasileiro, buscando identificar padrões regionais e sazonais que possam contribuir para o planejamento de políticas públicas. Adicionalmente, pretende-se investigar a relação entre as concentrações de PM_{2.5} e a ocorrência de focos de incêndio, bem como estimar a população potencialmente exposta a níveis elevados desse poluente.

2. Material e Métodos

2.1. Conjunto de Dados

Para a execução destas análises, serão utilizados os dados de concentração de PM_{2.5} provenientes da base “CAMS global reanalysis (EAC4)”, disponibilizada pelo programa Copernicus e produzida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 2026]. Essa base fornece dados de reanálise atmosférica obtidos por meio da integração entre observações e modelos numéricos. Como limitação destes dados pode-se citar sua resolução espacial de $0,75^\circ \times 0,75^\circ$, visto que com esse tipo de resolução, uma análise a nível municipal pode ser afetada por valores de municípios vizinhos.

Os limiares de concentração de PM_{2.5} adotados neste estudo foram baseados nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da Organização Mundial da Saúde (OMS), utilizando-se os valores anuais de referência e das metas intermediárias [World Health Organization 2021]. Embora a OMS também estabeleça limites para exposições de curto prazo (24 horas), não são disponibilizados limiares específicos para análises em escala mensal. Dessa forma, optou-se pela utilização dos valores anuais como referência para a classificação das concentrações, abordagem utilizada por se tratar de uma medida de exposição a maior prazo.

A padronização das cores utilizadas para cada limiar mensal foi baseada na escala empregada pelo sistema VIGIAR, do Ministério da Saúde, ilustrada na Figura ???. Essa escolha foi tomada visando facilitar a interpretação dos resultados e manter a com-

patibilidade visual com ferramentas já utilizadas no contexto da vigilância em saúde no Brasil.

Cor	Legenda
Azul	MP 2.5 <= 05
Verde	MP 2.5 > 05 e <= 10
Amarelo	MP 2.5 > 10 e <= 15
Laranja	MP 2.5 > 15 e <= 25
Marrom	MP 2.5 > 25

Figura 1. Escala de cores escolhida pelo sistema VIGIAR para os limiares de concentração PM2.5 da OMS

Também serão utilizados as bases cartográficas de Malhas Territoriais disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) 2025], abrangendo os limites municipais, estaduais e dos biomas brasileiros, que servirão como referência para as análises espaciais. Adicionalmente, serão empregados dados de estimativas populacionais do mesmo instituto, possibilitando avaliar a distribuição estimada da população em relação aos diferentes níveis de concentração de PM2.5 [Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) 2024].

Por fim, serão utilizados os dados de focos de queimadas disponibilizados pelo Programa Queimadas [Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) 2026], com o objetivo de investigar possíveis relações entre a ocorrência de queimadas e as concentrações de PM2.5 nas diferentes regiões do Brasil.

2.2. Metodologia

A metodologia empregada neste estudo consistiu, inicialmente, na obtenção dos dados de concentração de PM2.5. Para isso, foram selecionados os dados referentes ao período de agosto de 2022 a agosto de 2025, correspondente ao intervalo de 3 anos mais recente disponível na plataforma utilizada. Em seguida, as concentrações foram convertidas para a unidade de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, calculadas suas médias mensais e agregadas em diferentes níveis territoriais, incluindo municípios, unidades federativas e biomas.

Para as análises em nível de unidades federativas e biomas, foram calculadas estatísticas descritivas adicionais, como valores mínimos, máximos, desvio padrão e percentis espaciais das concentrações, visando armazenar a variabilidade da concentração de PM2.5 dentro dessas áreas. Posteriormente, foram geradas plotagens das médias mensais agregadas para nível territorial, bem como realizado o armazenamento dos resultados em um banco de dados para sustentar análises complementares.

Com o objetivo de investigar a relação entre as concentrações de PM2.5 e a ocorrência de queimadas, foram obtidos os dados de focos de queimadas e realizado o agrupamento mensal dessas ocorrências. Após o processamento, os dados foram armazenados em banco de dados e utilizados na elaboração de plotagens gráficas e séries temporais com as concentrações de PM2.5, permitindo a identificação de padrões espaciais e temporais entre os dois fenômenos.

Por fim, foram obtidos os dados de estimativas populacionais, que também foram armazenados em banco de dados e integrados às análises espaciais. Essa etapa possibilitou

a estimativa da população potencialmente exposta a altos níveis de concentração de PM2.5 observados no território brasileiro durante o ano de 2024, mostrando assim o potencial dessas análises do ponto de vista de saúde pública.

O fluxo metodológico adotado neste estudo encontra-se ilustrado na Figura 2.

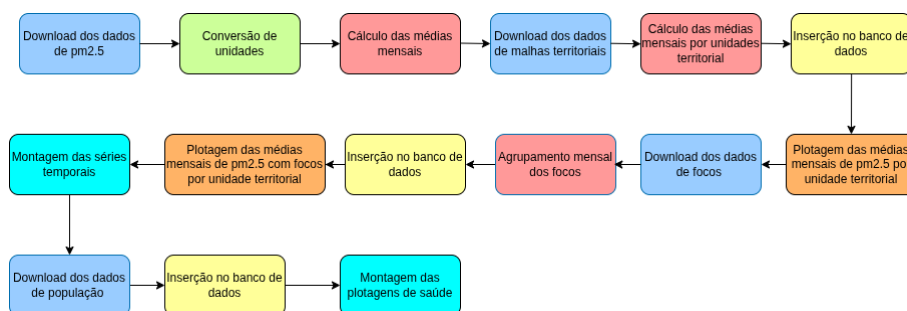


Figura 2. Fluxograma das etapas metodológicas realizadas

3. Resultados e discussões

A análise da distribuição espaço-temporal das concentrações de PM2.5 revelou padrões sazonais bem definidos ao longo do território brasileiro. As médias mensais indicam que os maiores níveis de material particulado ocorreram principalmente entre os meses de agosto e novembro, período que coincide com a estação seca e com o aumento da ocorrência de queimadas em grande parte do país. Em contrapartida, durante os meses mais chuvosos, especialmente entre janeiro e maio, observou-se uma redução significativa das concentrações, com predominância de valores enquadrados nas categorias de menor risco estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam um exemplo dessa variabilidade ao comparar os meses de setembro de 2024 e maio de 2025 nos níveis sem agregação, nível municipal, nível estadual e nível de bioma, respectivamente. Enquanto setembro de 2024 apresentou extensas áreas classificadas acima de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, principalmente nas regiões Norte, Centro-Oeste, Sul e em grande parte do Sudeste, em maio de 2025 predominam concentrações inferiores a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na maior parte do território nacional. Esse comportamento evidencia a forte influência da sazonalidade climática sobre os níveis de poluição atmosférica.

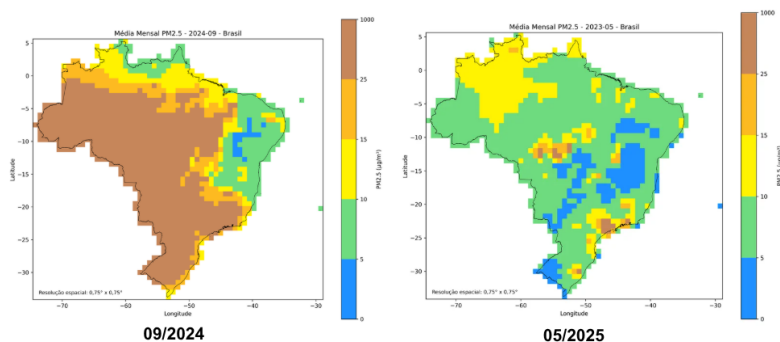


Figura 3. Médias mensais de PM2.5 sem agregações por unidades territoriais - mês 09/2024 e 05/2025

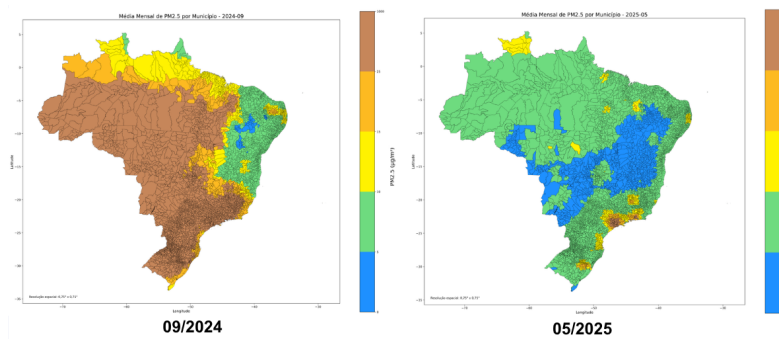


Figura 4. Médias mensais de PM2.5 com agregação a nível de município - mês 09/2024 e 05/2025

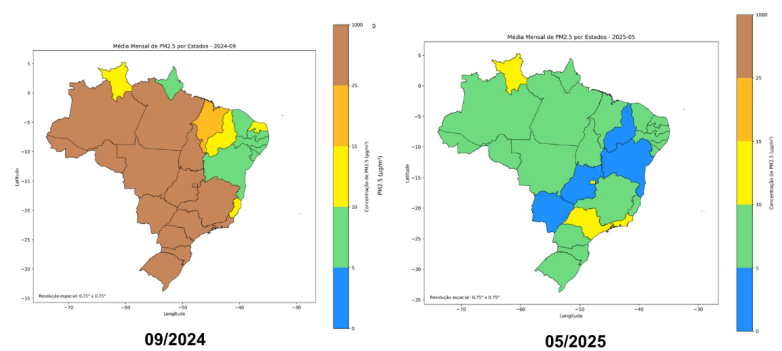


Figura 5. Médias mensais de PM2.5 com agregação a nível de unidade federativa - mês 09/2024 e 05/2025

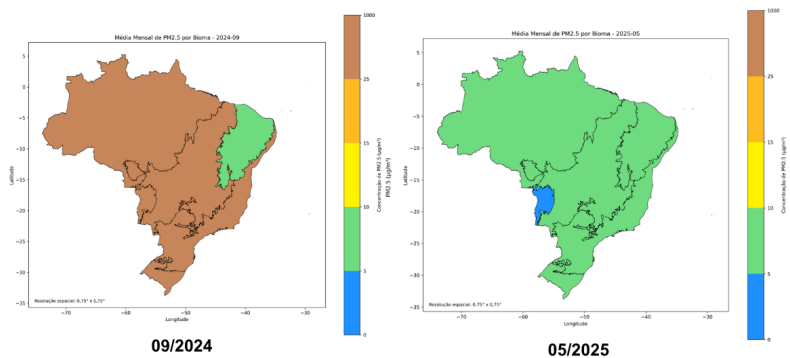


Figura 6. Médias mensais de PM2.5 com agregação a nível de bioma - mês 09/2024 e 05/2025

A integração entre as concentrações de PM2.5 e os focos de queimadas, demonstrada na Figura 7 evidenciou a correspondência espacial entre as áreas mais poluídas e as regiões com maior ocorrência de incêndios. Em setembro de 2024, por exemplo, observa-se elevada densidade de focos distribuídos sobre regiões que apresentaram concentrações superiores a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por outro lado, em maio de 2025, período com menor atividade de queimadas, as concentrações permaneceram predominantemente abaixo de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esses resultados sugerem uma associação direta entre a emissão de poluentes provenientes das queimadas e o aumento dos níveis de PM2.5 na atmosfera.

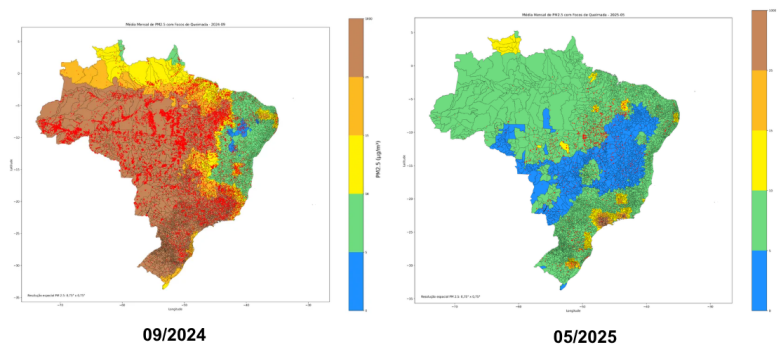


Figura 7. Médias mensais de PM2.5 com agregação a nível municipal e presença de focos de queimadas - mês 09/2024 e 05/2025

A sequência temporal das agregações por bioma, presente na Figura 8, reforça a existência de um padrão sazonal recorrente. Em praticamente todos os anos analisados, observa-se aumento das concentrações durante os meses secos, seguido de redução durante o período chuvoso. Esse comportamento sugere que fatores meteorológicos, associados ao aumento das queimadas e à menor dispersão atmosférica, exercem papel fundamental na dinâmica espacial e temporal do PM2.5 no Brasil.

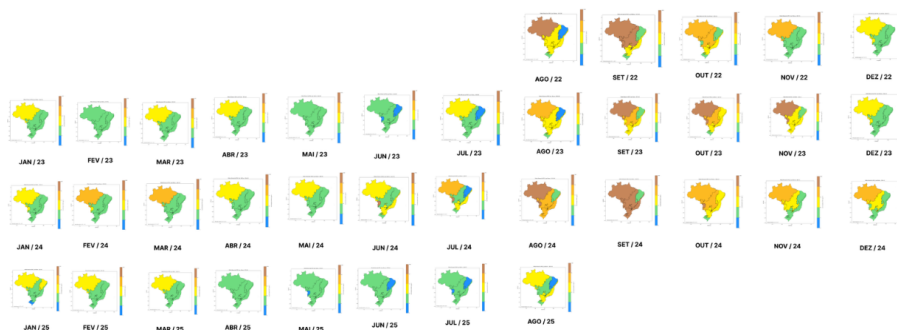


Figura 8. Médias mensais de PM2.5 com agregação a nível de bioma - período 08/2024 à 08/2025

As séries temporais por bioma, demonstradas na Figura 9 corroboram essa relação. Na Amazônia, os maiores picos de concentração coincidem com períodos de intensa atividade de queimadas, especialmente durante os meses de agosto a outubro de cada ano. O mesmo comportamento é observado no Cerrado e no Pantanal, onde aumentos expressivos no número de focos são acompanhados por elevações significativas das concentrações médias de PM2.5. Embora outros fatores, como condições meteorológicas e transporte atmosférico, também influenciam os níveis observados, os resultados indicam que as queimadas constituem um dos principais fatores associados a má qualidade do ar no território brasileiro.

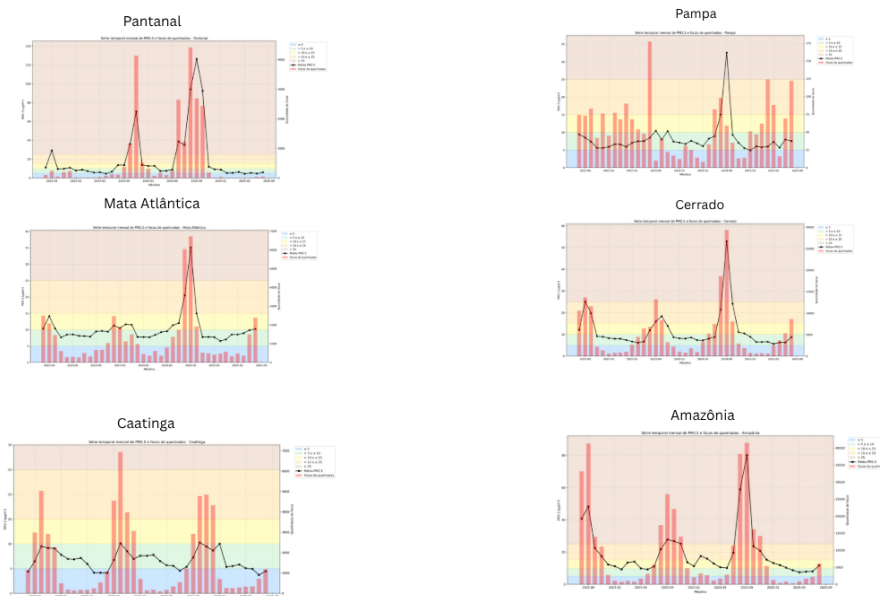


Figura 9. Série temporal das médias mensais de PM_{2.5} com agregação a nível de bioma e focos de queimadas

Por fim, a análise da população exposta revelou um potencial impacto significativo sobre a saúde pública. Considerando os estados que permaneceram por pelo menos quatro meses consecutivos com concentrações médias mensais superiores a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estima-se que aproximadamente 95,2 milhões de pessoas tenham sido expostas a níveis elevados de material particulado fino, correspondendo a cerca de 44,6 por cento da população brasileira. Entre os estados mais afetados destacam-se São Paulo, Rio de Janeiro, Pará e Amazonas, que concentram grandes populações e apresentaram períodos prolongados de exposição acima das metas intermediárias da OMS como demonstrado na Figura 10.

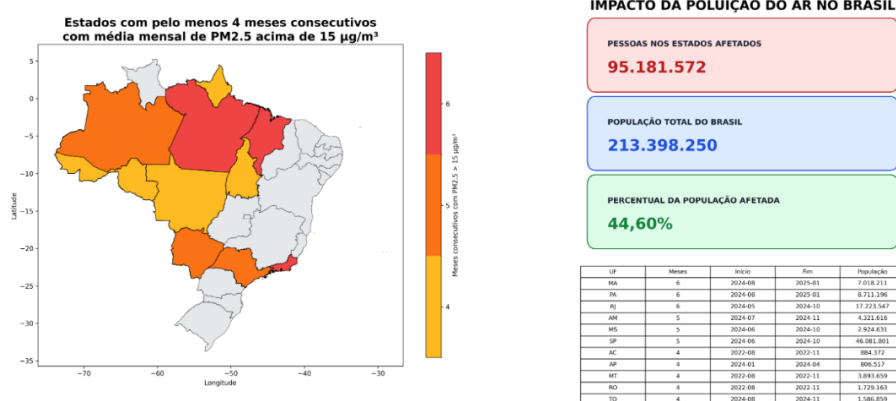


Figura 10. Estados com médias mensais de PM_{2.5} altas por pelo menos 4 meses e população exposta

4. Conclusão

Este estudo analisou a distribuição espaço-temporal das concentrações de PM_{2.5} no território brasileiro entre agosto de 2022 e agosto de 2025, permitindo identificar padrões

regionais e sazonais bem definidos. Os resultados evidenciaram concentrações mais elevadas principalmente durante os períodos de seca, com destaque para as regiões e biomas historicamente mais afetados por queimadas, demonstrando a influência desse fenômeno sobre a qualidade do ar.

A integração entre os dados de PM_{2.5} e os focos de queimadas possibilitou observar uma forte relação espacial e temporal entre os dois fenômenos, indicando que o aumento da ocorrência de incêndios está associado à elevação das concentrações de material particulado em diversas regiões do país. Além disso, a incorporação de dados populacionais permitiu estimar a população potencialmente exposta a níveis elevados de poluição atmosférica, evidenciando o potencial da metodologia para auxiliar avaliações de impacto e apoiar a criação de políticas públicas voltadas à saúde.

Como trabalhos futuros, destaca-se a possibilidade de expansão das análises por meio da geração de mapas informativos voltados à comunicação dos riscos à população e aos órgãos públicos. Também podem ser exploradas de forma mais detalhada as estatísticas espaciais calculadas, como valores máximos, mínimos, médias, desvios padrão e percentis, permitindo uma melhor compreensão da variabilidade espacial das concentrações de PM_{2.5}.

Referências

- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2025). Relatório de metodologia para avaliação da qualidade do ar. Technical report, CETESB, São Paulo. Acesso em: 02 abr. 2026.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (2026). CAMS global reanalysis (EAC4). Acesso em: 19 abr. 2026.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2024). Estimativas de população. Acesso em: 20 abr. 2026.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2025). Malhas territoriais. Acesso em: 20 abr. 2026.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (2026). Programa queimadas – dados abertos: focos de queimadas. Acesso em: 25 mai. 2026.
- Ministério da Saúde (2026). Vigilância em saúde de populações expostas a poluentes atmosféricos (Vigiar). Acesso em: 21 abr. 2026.
- Van Donkelaar, A. et al. (2010). Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environmental Health Perspectives*, 118(6):847–855.
- World Health Organization (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Technical report, World Health Organization, Geneva.
- World Health Organization (2025). Air quality monitoring for enhanced understanding of health impacts and beyond. Technical report, World Health Organization, Geneva. Air Quality, Energy and Health, Science and Policy Summaries.
- Xing, Y.-F. et al. (2016). The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*, 8(1):69–74.