

Qualidade do ar em Minas Gerais: análise da conformidade com padrões nacionais e internacionais

Adriana Alves Pereira Wilken^{1*}, Augusto César Dionísio Batista²,

¹Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil. (*Autora correspondente: adrianaw@cefetmg.br)

²Engenheiro Ambiental e Sanitarista, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 06/07/2026 – Revisado em: 29/07/2026 – Aceito em: 10/08/2026

RESUMO

A gestão da qualidade do ar depende da identificação de áreas onde as concentrações de poluentes ultrapassam os valores de referência estabelecidos para proteger a saúde humana. Comparações entre os padrões brasileiros e internacionais de qualidade do ar, e o atendimento a esses padrões, ainda são escassas na literatura. Este trabalho comparou os padrões estadual e nacional de qualidade do ar (Resolução CONAMA nº 506/2024) com os padrões da União Europeia (UE), dos Estados Unidos (EUA) e da Organização Mundial da Saúde (OMS), e avaliou, para Minas Gerais, a conformidade das concentrações de PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃, CO e PTS a esses padrões. Foram utilizados dados de 2023 de todas as estações automáticas de monitoramento do estado, obtidos junto à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) e agrupados em 5 regiões. Os padrões brasileiros mostraram-se menos restritivos que os internacionais, especialmente frente às diretrizes da OMS. A cobertura do monitoramento é limitada, concentrando-se principalmente na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Os padrões anuais da OMS para PM₁₀, PM_{2.5} e NO₂ não foram atendidos em nenhuma região, enquanto SO₂, O₃ e CO, monitorados em apenas duas regiões, apresentaram conformidade superior a 90% frente à OMS. Não há padrões internacionais para PTS, mas esse poluente apresentou conformidade superior a 92% frente às normas brasileiras. Conclui-se que há um desafio persistente para alcançar e manter qualidade do ar satisfatória em Minas Gerais, com exposição contínua da população a poluentes acima das concentrações recomendadas para a saúde pública.

Palavras-Chaves: Poluição atmosférica, Padrões de qualidade do ar, Monitoramento da qualidade do ar.

Air quality in Minas Gerais: analysis of compliance with national and international standards

ABSTRACT

Air quality management depends on identifying areas where pollutant concentrations exceed the reference values established to protect human health. Comparisons between Brazilian and international air quality standards, and actual compliance with these standards, remain scarce in the literature. This study compared Brazilian state and national air quality standards (CONAMA Resolution No. 506/2024) with the standards of the European Union (EU), the United States (USA), and the World Health Organization (WHO), and assessed, for the state of Minas Gerais, compliance of PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃, CO, and TSP concentrations with these standards. Data from 2023 from all automatic monitoring stations in the state were used, obtained from the State Environmental Foundation (FEAM) and grouped into five regions. Brazilian standards proved less restrictive than international ones, especially compared to WHO guidelines. Monitoring coverage in the state is limited, concentrated mainly in the Metropolitan Region of Belo Horizonte. The WHO annual standards for PM₁₀, PM_{2.5}, and NO₂ were not met in any region, while SO₂, O₃, and CO, monitored in only two regions, showed compliance above 90% with WHO guidelines. No international standards exist for TSP, but this pollutant showed compliance above 92% with Brazilian standards. It is concluded that a persistent challenge remains in achieving and maintaining satisfactory air quality in Minas Gerais, with continuous population exposure to pollutants above the concentrations recommended for public health.

Keywords: Air pollution, Air quality standards, Air quality monitoring.

Wilken, A. A. P., & Batista, A. C. D. (2026). Qualidade do ar em Minas Gerais: Análise da conformidade com padrões nacionais e internacionais. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.14, n.2, p.392-415.



Calidad del aire en Minas Gerais: análisis del cumplimiento de normas nacionales e internacionales

RESUMEN

La gestión de la calidad del aire depende de identificar áreas donde las concentraciones de contaminantes superan los valores de referencia establecidos para proteger la salud humana. Las comparaciones entre los estándares brasileños e internacionales, y su cumplimiento real, siguen siendo escasas en la literatura. Este estudio comparó los estándares estatales y nacionales de Brasil (Resolución CONAMA n.º 506/2024) con los estándares de la Unión Europea (UE), los Estados Unidos (EE. UU.) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), y evaluó, para Minas Gerais, el cumplimiento de las concentraciones de PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃, CO y PTS con dichos estándares. Se utilizaron datos de 2023 de todas las estaciones automáticas del estado, obtenidos de la Fundación Estatal de Medio Ambiente (FEAM) y agrupados en cinco regiones. Los estándares brasileños resultaron menos restrictivos que los internacionales, especialmente frente a la OMS. La cobertura del monitoreo es limitada, concentrada principalmente en la Región Metropolitana de Belo Horizonte. Los estándares anuales de la OMS para PM₁₀, PM_{2.5} y NO₂ no se cumplieron en ninguna región, mientras que SO₂, O₃ y CO, monitoreados en solo dos regiones, mostraron conformidad superior al 90% frente a la OMS. No existen estándares internacionales para PTS, pero este contaminante mostró conformidad superior al 92% frente a las normas brasileñas. Se concluye que persiste un desafío para mantener una calidad del aire satisfactoria en Minas Gerais, con exposición continua de la población a contaminantes por encima de las concentraciones recomendadas para la salud pública.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, Estándares de calidad del aire, Monitoreo de la calidad del aire.

1. Introdução

A poluição atmosférica, fenômeno caracterizado pela presença nociva de gases e partículas no ar, emerge primordialmente de atividades industriais, de mineração e da combustão de carvão e de petróleo e seus derivados em usinas, veículos e sistemas de aquecimento. Essas fontes, juntamente com a expansão urbana, podem comprometer a qualidade do ar, resultando em danos à saúde pública e ao meio ambiente (Le et al., 2024; Zhang et al., 2025).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) desempenha um papel crucial na definição de padrões globais de qualidade do ar, com o objetivo de proteger a saúde pública e o meio ambiente. Em 2021, as diretrizes para orientar políticas e ações globais nessa temática foram revisadas, recomendando padrões mais rígidos para substâncias como material particulado PM₁₀ e PM_{2.5}, O₃, NO₂, SO₂ e CO, reconhecendo a necessidade de um controle mais eficaz para reduzir os impactos adversos à saúde causados pela poluição do ar (WHO, 2021; Velasco; Jarosińska, 2022).

Nos últimos anos, diversos países têm implementado legislações para garantir a qualidade do ar e proteger a saúde pública (Lode, Schönberger e Toussaint, 2016). No Brasil, a Resolução CONAMA n.º 506/2024 estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar, determinando valores de concentração máximos para vários poluentes e um cronograma de etapas com os valores finais baseados nas diretrizes da OMS de 2021 (Brasil, 2024a; WHO, 2021). Similarmente, países desenvolvidos e grupos econômicos, como a União Europeia (UE) e os Estados Unidos (EUA), também possuem legislações específicas com limites estabelecidos para diversos poluentes. Na UE, a principal norma que estabelece padrões de qualidade do ar é a Diretiva 2008/50/EC, conhecida como a Diretiva da Qualidade do Ar Ambiente e Ar Mais Limpo para a Europa (European Commission, 2008). Nos EUA, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos pelo *US Clean Air Act* de 1963 (que teve importantes revisões, principalmente em 1970), uma lei federal que estrutura toda a política de controle da poluição atmosférica no país (USEPA 2024a; USEPA 2024b).

Alguns estudos destacaram a urgência de atualizar os padrões de qualidade do ar no Brasil, considerando que os resultados das concentrações de diversos poluentes atmosféricos ultrapassam as diretrizes da OMS (Andreão et al., 2020; Boari, Pedruzzi e Vieira-Filho, 2023; Cevolani et al., 2024), além de mostrarem associações com doenças respiratórias em diversas cidades brasileiras (Gouveia et al., 2019; Coker et al., 2022; Brum et al., 2025).

No estado de Minas Gerais, os padrões de qualidade do ar são determinados pela Deliberação Normativa (DN) COPAM nº 248/2023. Esta norma determina valores de concentração máximos para vários poluentes e um cronograma de etapas com os valores finais baseados nas diretrizes anteriores da OMS, ou seja, de 2005 (Minas Gerais, 2023; WHO, 2005). Na literatura, há uma carência de detalhamento de comparativos de padrões de qualidade do ar estadual e nacional com padrões internacionais (Amaral, Rêgo e Northcross, 2023), além de poucos estudos comparativos de dados de qualidade do ar com esses padrões, no que se refere ao estado de Minas Gerais (Ribeiro, Galvão e Albuquerque, 2023; Queiroz, et al., 2020).

Dessa forma, este trabalho comparou os padrões de qualidade do ar das normas estadual e nacional com padrões internacionais (UE, EUA e OMS) e avaliou, para o estado de Minas Gerais, o atendimento das concentrações de PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 , SO_2 e CO a esses padrões. Assim, buscou-se compreender a posição do estado de Minas Gerais no panorama nacional e internacional em termos de políticas ambientais na área de qualidade do ar.

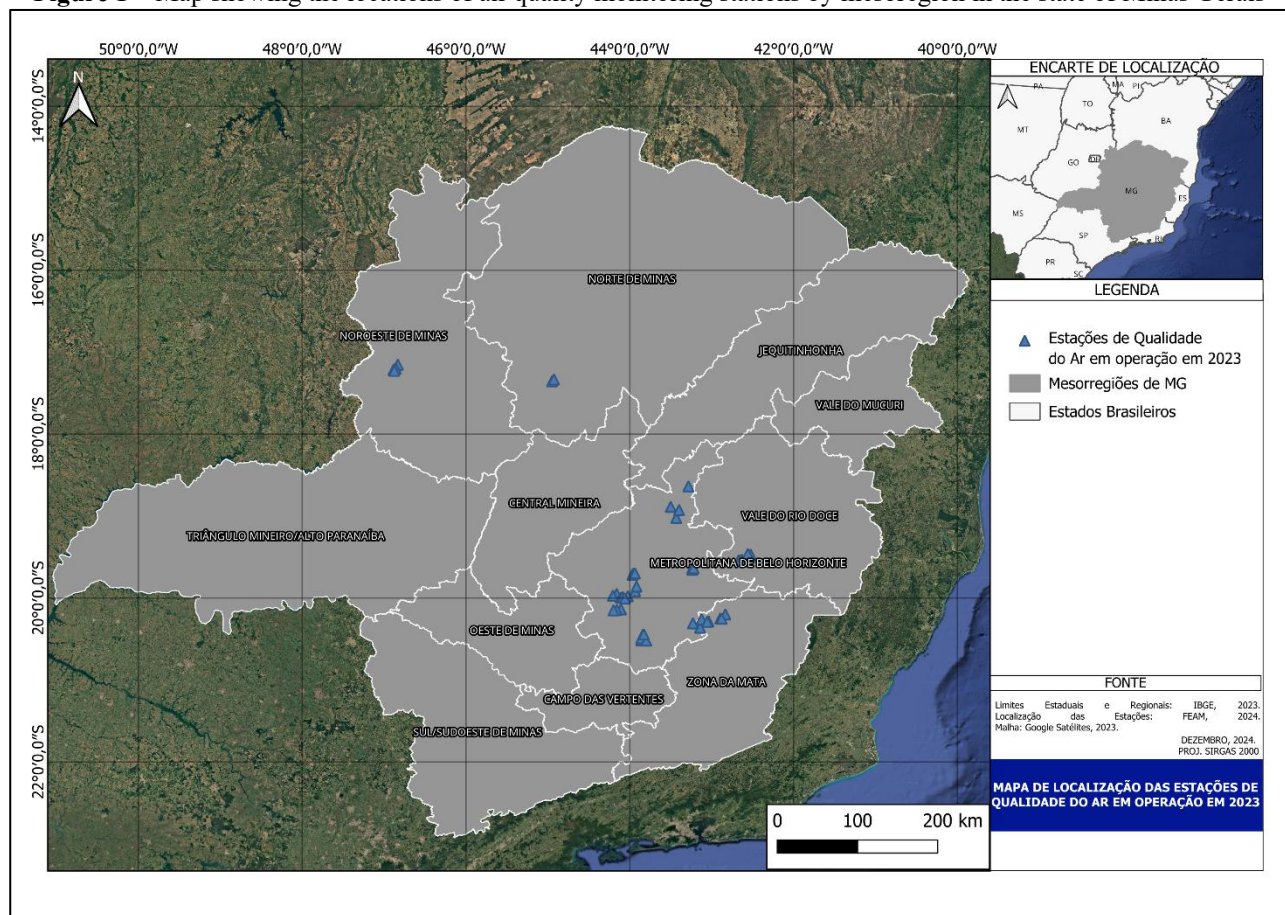
2. Material e Métodos

Foram utilizados dados de qualidade do ar de todas as estações automáticas do estado de Minas Gerais do ano de 2023. Foram analisados os seguintes poluentes: Partículas Totais em Suspensão (PTS), PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 , SO_2 e CO. Os dados foram obtidos no site da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) (Minas Gerais, 2024).

Os dados foram registrados em concentrações horárias para cada estação nas cidades cobertas pela rede de monitoramento do estado, o que indicou 52 estações de monitoramento, que foram georreferenciadas. As análises foram realizadas através do agrupamento das estações de monitoramento presentes em diferentes regiões de Minas Gerais, de acordo com as divisões geográficas das mesorregiões estabelecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (Minas Gerais, 2022). A delimitação espacial das mesorregiões foi realizada a partir de um arquivo *shapefile* obtido no IDE SISEMA, assegurando a integração de dados espaciais confiáveis (Minas Gerais, 2025). As regiões incluídas no estudo foram: Norte de Minas (2 estações), Noroeste (5 estações), Zona da Mata (7 estações), Vale do Rio Doce (9 estações) e Metropolitana (29 estações) (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização das estações de monitoramento da qualidade do ar por mesorregião no estado de Minas Gerais

Figure 1 – Map showing the locations of air quality monitoring stations by mesoregion in the state of Minas Gerais



Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Algumas regiões de Minas Gerais não foram incluídas na análise devido à ausência de redes públicas de monitoramento de qualidade do ar operadas pela FEAM. Além disto, das estações selecionadas, nem todas monitoram todos os sete poluentes considerados neste estudo e nem todos os horários possuíam dados disponíveis, devido a possíveis interrupções ou falhas no monitoramento.

Os dados brutos horários foram organizados e adequados para que pudessem ser comparados aos padrões de qualidade do ar, considerando os períodos de referência de curto e longo prazo (Brasil, 2024a). No que se refere ao curto prazo, as concentrações dos poluentes PTS, PM₁₀, PM_{2.5} e SO₂ foram calculadas com base na média aritmética de 24 horas, enquanto para o NO₂, adotou-se a máxima média horária obtida no dia. Para os poluentes O₃ e CO, foi aplicada a máxima média móvel de 8 horas. Em relação ao longo prazo, a avaliação foi conduzida por meio da média aritmética anual para os poluentes PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ e SO₂ e para o PTS foi empregada a média geométrica anual.

Todas as fórmulas utilizadas no processo de adequação seguiram as diretrizes estabelecidas no Guia Técnico para o Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar (Brasil, 2019), que define procedimentos para garantir a representatividade temporal dos dados. De acordo com o guia técnico, somente foram considerados representativos os dados das redes de monitoramento que atenderam, no mínimo, às exigências descritas na

Tabela 1. Nos casos de dados incompletos ou ausentes, foi realizada a exclusão de séries não representativas, conforme os critérios de representatividade dessa mesma tabela.

Tabela 1 – Tempo mínimo de amostragem para que os dados de monitoramento da qualidade do ar sejam considerados representativos

Table 1 – Minimum sampling time required for air quality monitoring data to be considered representative

Tipo de Média	Crítérios de Validação
Média horária	3/4 das medidas válidas na hora
Média diária	2/3 das médias horárias válidas no dia
Média mensal	2/3 das médias diárias válidas no mês
Média anual	1/2 das médias diárias válidas obtidas em cada quadrimestre

Fonte: Adaptado de Brasil (2019)

Source: Adapted from Brazil (2019)

Após a adequação dos dados às exigências normativas, foi avaliada a conformidade das concentrações de poluentes, em cada região e no estado como um todo, às normas estudadas (Brasil, 2024a; Minas Gerais, 2023; European Commission, 2008; USEPA 2024b; WHO, 2021).

Para compor as comparações, em relação aos limites nacionais, foi considerado o padrão intermediário PI-2 da Resolução CONAMA nº 506/2024, que entrou em vigor a partir de 01/01/2025 e permanecerá válido até 2033. Em contrapartida, para a DN COPAM nº 248/2023, utilizou-se o PI-1, que ainda permanece em vigor, uma vez que Minas Gerais não implementou uma nova resolução alinhada aos prazos para o avanço dos padrões intermediários, como os definidos pela Resolução CONAMA nº 506/2024. Para os poluentes PTS e CO, foram considerados os respectivos Padrão Final (PF) determinados nessas normas (Brasil, 2024a; Minas Gerais, 2023).

Durante a análise comparativa das legislações de qualidade do ar, observou-se que algumas normativas, em especial a legislação dos Estados Unidos (USEPA), adotam formas de atendimento baseadas em percentis trianuais (como o percentil 98 ou 99) ou excedências anuais controladas. No entanto, para fins desta pesquisa, a conformidade foi avaliada de forma mais direta, considerando dentro dos limites os dados que se enquadram nos valores máximos estabelecidos por cada legislação e fora dos limites aqueles que ultrapassarem esses valores. Essa premissa foi adotada em razão das limitações do conjunto de dados disponível, que não permite o cálculo preciso de percentis trianuais, por exemplo.

Adicionalmente, foi realizada uma análise estatística descritiva para apresentar as concentrações de poluentes em cada região e no estado, considerando o conjunto de todas as estações de monitoramento de qualidade do ar de Minas Gerais. Esses cálculos contemplaram os períodos de curto prazo e longo prazo, de acordo com os padrões de qualidade do ar estudados.

3. Resultados e Discussão

3.1 Comparação entre os padrões de qualidade do ar

Os padrões de qualidade do ar do Brasil, da UE e dos EUA revela, para a maioria dos parâmetros, limites mais permissivos em comparação aos padrões recomendados pela OMS (Tabela 2).

Tabela 2 – Padrões de qualidade do ar dispostos nas normas brasileiras e internacionais
Table 2 - Air quality standards set forth in Brazilian and international regulations

Poluente	Período de Referência	Unidade	Valor-Limite				
			Resolução CONAMA nº 506/2024 - PI-2	Deliberação Normativa (DN) COPAM nº 248/2023 - PI-1	União Europeia (UE)	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado	24 horas	µg/m ³	100	120	50	150	45
- PM ₁₀	Anual ^(I)	µg/m ³	35	40	40	-	15
Material Particulado	24 horas	µg/m ³	50	60	-	35	15
- PM _{2.5}	Anual ^(I)	µg/m ³	17	20	25	9	5
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	µg/m ³	50	125	125	-(¹)	40
	Anual ^(I)	µg/m ³	30	40	-	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora ^(II)	µg/m ³	240	260	200	188 ⁽²⁾	200
	Anual ^(I)	µg/m ³	50	60	40	100 ⁽²⁾	10
Ozônio - O ₃	8 horas ^(III)	µg/m ³	130	140	120	137 ⁽²⁾	100
Monóxido de Carbono – CO ⁽³⁾	8 horas ^(III)	ppm	9	9	9 ⁽²⁾	9	9 ⁽²⁾
Partículas Totais em Suspensão – PTS ⁽³⁾	24 horas	µg/m ³	240	240	-	-	-
	Anual ^(IV)	µg/m ³	80	80	-	-	-

^(I) Médica aritmética anual; ^(II) Máxima média horária obtida no dia; ^(III) Máxima média móvel obtida no dia; ^(IV) Média geométrica anual.

⁽¹⁾ O valor é referente a um período de 1 hora, enquanto todas as demais legislações utilizam um período de referência de 24 horas.

⁽²⁾ A conversão de unidades de medida foi realizada para possibilitar a comparação entre normas. As conversões foram realizadas com base no volume molar de gases em condições padrão de temperatura e pressão (25 °C e 1 atm), que corresponde a 24,45 L/mol. Pesos moleculares dos poluentes: CO (28,01 g/mol), SO₂ (64,07 g/mol), NO₂ (46,01 g/mol) e O₃ (48 g/mol).

⁽³⁾ Os poluentes PTS e CO possuem valores únicos estabelecidos como Padrão Final (PF) na Resolução CONAMA nº 506/2024 e DN COPAM nº 248/2023.

Fonte: Adaptado de Brasil (2024a), Minas Gerais (2023), European Commission (2008), WHO (2021) e USEPA (2024)

Source: Adapted from Brasil (2024a), Minas Gerais (2023), European Commission (2008), WHO (2021) and USEPA (2024)

É importante reiterar que, embora a OMS não atue como uma entidade reguladora, suas recomendações se fundamentam em extensas revisões sistemáticas de estudos epidemiológicos, toxicológicos e de exposição, que subsidiaram, em 2021, reduções expressivas em relação aos valores de referência estabelecidos na versão anterior das diretrizes, de 2005 (WHO, 2005; WHO, 2021; Velasco; Jarosińska, 2022). Essa revisão foi motivada pelo acúmulo de evidências de efeitos adversos à saúde mesmo em concentrações inferiores às previamente consideradas seguras, sem a identificação de um limiar mínimo abaixo do qual não haja risco, sobretudo para o material particulado fino (Velasco; Jarosińska, 2022). Em escala global, estima-se que a poluição atmosférica ambiente esteja associada a milhões de mortes prematuras por ano, principalmente por doenças cardiovasculares, respiratórias crônicas e câncer de pulmão (Pozzer et al., 2023). Nesse sentido, embora não vinculantes, as diretrizes da OMS consolidam o patamar de referência para a proteção da saúde pública e ambiental, tornando-se parâmetro central para avaliar a adequação de normas nacionais e subnacionais, como as analisadas neste estudo.

Os padrões para PM_{10} e $PM_{2.5}$ apresentam divergências consideráveis entre as legislações analisadas. A OMS recomenda valores mais restritivos, estabelecendo um limite de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} em 24 h e $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anual. Para $PM_{2.5}$, os valores são ainda mais rigorosos: $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h) e $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) (Tabela 2). Em relação aos valores anuais, a forma de atendimento é direta, sem permitir excedências. Em relação aos limites de curto prazo (24 h) considera que, em um ano, é aceitável que ocorram até 4 dias em que os níveis de poluentes ultrapassem o limite, porque esses picos são eventos raros e não representam a condição geral da qualidade do ar (WHO, 2021).

Na UE, os limites são menos severos, com um padrão de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} em 24 h e $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anual. O valor de 24 h pode ser excedido até 35 vezes por ano, demonstrando maior flexibilidade no controle de picos esporádicos. Para o $PM_{2.5}$, o valor anual é de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sem margem para excedências (Tabela 2; European Commission, 2008).

Nos EUA, a USEPA impõe um limite de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} em 24 h, com a condição de que esse valor não deve ser excedido mais de uma vez por ano, considerando a média de três anos. Comparado com as demais normas, esse limite é o menos restritivo (Tabela 2). Para $PM_{2.5}$, o limite de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h) e $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) segue uma forma de atendimento baseada no percentil 98, permitindo pequenos picos ocasionais, desde que a média geral permaneça abaixo do limite (Tabela 2; USEPA, 2024). É o segundo padrão mais restritivo para medições anuais dentre as normas estudadas (Tabela 2).

A abordagem adotada pelas normas brasileiras envolve uma progressão por fases (PI-1 a PF). Inicialmente, o limite para PM_{10} é de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h), reduzindo gradualmente até alcançar $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PF), em conformidade com a OMS. O limite de 24 h do PI-2 (vigente) da Resolução CONAMA no 506/2024 ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) é mais permissivo que o da UE ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e mais restritivo que o da USEPA ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Tabela 2). Em relação ao limite anual, os padrões das normas brasileiras são próximos ao da UE ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), enquanto a USEPA não apresenta limite anual (Tabela 2; Brasil, 2024a; Minas Gerais, 2023).

Para o $PM_{2.5}$, as normas brasileiras determinam o valor inicial de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h), com previsão de diminuição progressiva até alcançar $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valor da OMS). Não há permissões explícitas para excedências dos padrões. O limite de 24 h da Resolução CONAMA no 506/2024 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) é mais permissivo que o da USEPA ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e não há padrão definido pela UE. Em relação ao padrão anual, o limite da norma brasileira ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$) é inferior ao da UE ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mas mais permissivo que o da USEPA ($9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Tabela 2; Brasil, 2024a; Minas Gerais, 2023).

Com relação aos padrões para SO_2 , a OMS recomenda um limite mais restritivo de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 h (Tabela 2). A forma de atendimento é realizada por percentil 99, ou seja, permite até 4 ultrapassagens do limite por ano (WHO, 2021). A UE adota um padrão mais permissivo, com $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 h e $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 1 h. A forma de atendimento permite até 3 excedências por ano no valor de 24 h, enquanto o valor de 1 h não deve ser excedido mais do que 24 vezes por ano (Tabela 2; European Commission, 2008). Nos EUA, a USEPA fixa um limite de 75 ppb (aproximadamente $196 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para 1 h, calculado com base no percentil 99 em três

anos, permitindo flexibilidade em eventos esporádicos, mas mantendo o controle rigoroso na média geral. Há também um limite secundário de 0,5 ppm (aproximadamente $1.310 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para 3 h, com a condição de que não deve ser excedido mais de uma vez por ano (USEPA, 2024). O Brasil segue uma trajetória iniciando com $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 h e convergindo para $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PF), em alinhamento com a OMS. A forma de atendimento é baseada na média aritmética diária, sem previsão de excedência (Tabela 2; Brasil, 2024a; Minas Gerais, 2023).

Para o NO_2 , A OMS recomenda um limite de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 1 h e $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anual, sem permitir excedências em ambos (Tabela 2; WHO, 2021). A UE estabelece o mesmo limite para 1h e $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anuais. Diferentemente da OMS, a forma de atendimento para o valor de 1 h permite até 18 excedências por ano, enquanto o valor anual não admite excedências (Tabela 2; European Commission, 2008). Nos EUA, a USEPA adota um limite de 100 ppb (aproximadamente $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para 1 h, com base no percentil 98 em três anos, e um limite anual de 53 ppb (aproximadamente $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), calculado por média aritmética (Tabela 2; USEPA, 2024). O Brasil parte de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PI-1) e $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PI-2) para 1 h, propondo redução para o padrão OMS ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) no PF. A norma federal atualmente adota o valor anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mais restritivo que a USEPA. A forma de atendimento segue o modelo de média aritmética diária e anual, sem excedências permitidas explicitamente (Tabela 2; Brasil, 2024a; Minas Gerais, 2023).

O O_3 é um dos poluentes regulados de forma mais semelhante entre as normas internacionais, com limites próximos, mas diferenças na forma de atendimento e cálculo das excedências. A OMS recomenda um limite de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, baseado na média máxima móvel de 8 h obtida no dia. Permite até 4 excedências por ano (Tabela 2; WHO, 2021). Na UE, o limite é de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 8 h, permitindo até 25 excedências por ano (Tabela 2; European Commission, 2008). A USEPA (EUA) adota um limite de 0,07 ppm para 8 h (aproximadamente $137 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A forma de atendimento considera a 4ª maior concentração diária de 8 h, com base em uma média de três anos (Tabela 2; USEPA, 2024). As normas brasileiras estabelecem inicialmente um limite de $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PI-1), reduzindo gradualmente para $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PF), em alinhamento com a OMS. A forma de atendimento é semelhante à média móvel da OMS, mas sem previsão de excedências (Tabela 2; Brasil, 2024a; Minas Gerais, 2023).

Comparando com as normas internacionais estudadas, os padrões de qualidade estabelecidos no Brasil para o PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , NO_2 e O_3 são, no geral, menos restritivos. Apesar do país ter avançado recentemente na regulação da poluição do ar, com a publicação da Política Nacional da Qualidade do Ar, Lei no 14.850/2024 (BRASIL, 2024b) e a nova da Resolução Conama (Brasil, 2024a), os padrões vigentes e os prazos propostos para atendimento aos PFs são considerados insuficientes para proteção da saúde da população e do meio ambiente (Buralli; Connerton, 2025; Amaral, Rêgo e Northcross, 2023).

O padrão para CO é o mesmo para todas as normas analisadas (9 ppm, com base na média máxima móvel para 8 h). As variações ocorrem apenas nas formas de atendimento. A OMS, UE ($10 \text{ mg}/\text{m}^3$ para 8 h) e as normas brasileiras não permitem excedências a esse valor. Nos EUA (USEPA), o padrão para CO não deve ser excedido mais de uma vez por ano, o que oferece certa flexibilidade em situações de pico isolado (Tabela 2; WHO, 2021; European Commission, 2008; USEPA, 2024; Brasil, 2024a; Minas Gerais, 2023).

Padrões para PTS não são definidos nas normas internacionais estudadas. Tanto a OMS quanto a UE e USEPA focam apenas em padrões das frações menores de material particulado (PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$), que têm maior impacto na saúde pública devido à capacidade de penetração nos pulmões e na corrente sanguínea (Nazarenko et al., 2025; Velasco; Jarosińska, 2022). No entanto, as normas brasileiras estabelecem o padrão de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 24 h e uma média geométrica anual de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 2). A justificativa para a manutenção desses limites no Brasil reflete a necessidade de controle em áreas industriais, mineradoras e regiões onde atividades de construção civil e queima de biomassa contribuem significativamente para a emissão de partículas maiores, que podem degradar a qualidade ambiental (Baird; Cann, 2011). Ademais, cabe frisar que nem todas as regiões dispõem de um sistema eficaz de monitoramento para partículas finas, o que também influencia na manutenção do monitoramento do PTS no país (Vormittag et al., 2021).

3.2 Análise da conformidade das concentrações de poluentes atmosféricos por região em Minas Gerais com os padrões de qualidade do ar estudados

A análise da qualidade do ar na região do Norte de Minas revelou elevada conformidade das medições de 24 h de PM₁₀ aos padrões menos restritivos (normas brasileiras e USEPA; Tabela 3).

Tabela 3 – Percentual de conformidade das concentrações de poluentes monitorados em 2 estações automáticas de qualidade do ar na Região Norte de Minas do estado de Minas Gerais (dados de 2023)

Table 3 - Percentage of compliance for the concentrations of monitored pollutants at two automatic air quality monitoring stations in the Northern Region of Minas, in the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA n° 506/2024 - PI-2	Deliberação Normativa COPAM n° 248/2023 - PI-1	União Europeia (UE)	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM ₁₀	24 horas	98,9%	100%	64,8%	100%	52,0%
	Anual	0%	0%	0%	*	0%

* reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa.

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Entretanto, o percentual de resultados conformes caiu quando comparado aos padrões mais restritivos, como é o caso dos padrões da UE (64,8%) e da OMS (52,0%) (Tabela 3). Nas medições médias anuais de PM₁₀, a situação se mostrou mais crítica. A conformidade foi 0% em relação a todas as normas estudadas (Tabela 3). A elevada conformidade nas médias de 24 h aos padrões menos restritivos indica baixa frequência de episódios agudos de poluição, com valor máximo registrado de 119 µg/m³ (Tabela 4). Por outro lado, as não conformidades na média anual sugerem que as concentrações de PM₁₀ permaneceram relativamente elevadas de forma persistente ao longo do ano (média de 47,3 µg/m³, Tabela 4).

Tabela 4 – Estatística descritiva das concentrações de poluentes monitorados em 2 estações automáticas de qualidade do ar na Região Norte de Minas do estado de Minas Gerais (dados de 2023)

Table 4 - Descriptive statistics on the concentrations of monitored pollutants at two automatic air quality monitoring stations in the Northern Region of Minas, in the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Nº dados	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Material Particulado - PM ₁₀ (µg/m ³)	562	47,3	44,5	10,7	119	16,6

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

A análise da qualidade do ar na região do Noroeste revelou 100% de conformidade das medições de 24 h de PM₁₀ aos padrões menos restritivos (normas brasileiras e USEPA; Tabela 5).

Tabela 5 – Percentual de conformidade das concentrações de poluentes monitorados em 5 estações automáticas de qualidade do ar na Região Noroeste do estado de Minas Gerais (dados de 2023)**Table 5** - Percentage of compliance with monitored pollutant concentrations at 5 automatic air quality monitoring stations in the Northwest Region of the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA n° 506/2024 - PI-2	Deliberação Normativa COPAM n° 248/2023 - PI-1	União Europeia (UE)	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM ₁₀	24 horas	100%	100%	87,4%	100%	82,1%
	Anual	80,0%	80,0%	80,0%	*	0%
Material Particulado - PM _{2.5}	24 horas	99,8%	100%	*	99,8%	78,6%
	Anual	100%	100%	100%	0%	0%
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	100%	100%	*	*	*
	Anual	100%	100%	*	*	*

* reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa.

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Da mesma forma que na região Norte de Minas, o percentual de resultados conformes caiu quando comparado aos padrões mais restritivos, como é o caso dos padrões da UE (87,4%) e da OMS (82,1%) (Tabela 5). Para as medições médias anuais de PM₁₀, não foi registrada conformidade em relação ao padrão da OMS, o mais restritivo de todos (Tabela 5). O valor médio registrado foi de 31,9 µg/m³ (Tabela 6).

Tabela 6 – Estatística descritiva das concentrações de poluentes monitorados em 5 estações automáticas de qualidade do ar na Região Noroeste do estado de Minas Gerais (dados de 2023)**Table 6** - Descriptive statistics on the concentrations of monitored pollutants at 5 automatic air quality monitoring stations in the Northwest Region of the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Nº dados	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Material Particulado - PM ₁₀ (µg/m ³)	1.618	31,9	29,4	6,3	95,8	15,0
Material Particulado - PM _{2.5} (µg/m ³)	463	11,4	10,3	2,3	59,8	6,0
Partículas Totais em Suspensão - PTS (µg/m ³)	1.540	54,4	49,6	10,2	177	26,9

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

O PM_{2.5} (24 h), que apresentou valor médio de 11,4 µg/m³ (Tabela 6), apresentou conformidade acima de 99 % com os padrões estudados, mas menor % de atendimento (78,6 %) ao padrão mais restritivo da OMS (Tabela 5). Para as medições médias anuais de PM_{2.5}, não foram registradas conformidades em relação aos padrões mais restritivos, ou seja, da USEPA e da OMS (Tabela 5).

As medições de PTS indicaram 100% de conformidade às normas brasileiras (Tabela 5), que registraram valores médio (54,4 µg/m³) e máximo (177 µg/m³) abaixo dos limites legais (Tabela 6).

Na Zona da Mata, os resultados de PM₁₀ e PM_{2.5} (24 h) apresentaram elevada conformidade em relação a todas as normas estudadas (Tabela 7).

Tabela 7 – Percentual de conformidade das concentrações de poluentes monitorados em 7 estações automáticas de qualidade do ar na Região Zona da Mata do estado de Minas Gerais (dados de 2023)

Table 7 - Percentage of compliance for the concentrations of monitored pollutants at 7 automatic air quality monitoring stations in the Zona da Mata region of the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA nº 506/2024 - PI-2	Resolução COPAM nº 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM ₁₀	24 horas	100%	100%	99,6%	100%	99,0%
	Anual	100%	100%	100,0%	*	0,0%
Material Particulado - PM _{2.5}	24 horas	100%	100%	*	100%	97,5%
	Anual	100%	100%	100%	100%	0%
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	100%	100%	*	*	*
	Anual	100%	100%	*	*	*

* reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa.

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

No entanto, os níveis médios anuais ultrapassaram integralmente os valores recomendados pela OMS (15 µg/m³ e 5 µg/m³, respectivamente) (Tabela 7). A discrepância entre a alta conformidade aos limites diários da OMS e a ausência de conformidade aos limites anuais pode ser atribuída a picos pontuais de poluição, que não compromete os valores de 24 h, mas contribuem para elevações consistentes nas médias anuais, com valores máximos registrados de 65,8 µg/m³ para PM₁₀ e 28,6 µg/m³ para PM_{2.5} (Tabela 8).

Para o PTS, as medições diárias e médias anuais apresentaram 100% de conformidade em relação às normas nacionais (Tabela 7).

Tabela 8 – Estatística descritiva das concentrações de poluentes monitorados em 7 estações automáticas de qualidade do ar na Região Zona da Mata do estado de Minas Gerais (dados de 2023)**Table 8** - Descriptive statistics on the concentrations of monitored pollutants at 7 automatic air quality monitoring stations in the Zona da Mata region of the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Nº dados	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Material Particulado - PM ₁₀ (µg/m³)	2.478	21,4	20,2	5,2	65,8	7,5
Material Particulado - PM _{2.5} (µg/m³)	2.133	7,8	7,3	2,5	28,6	2,7
Partículas Totais em Suspensão - PTS (µg/m³)	722	37,5	35,3	9,4	117	13,3

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Na região do Vale do Rio Doce, os resultados de PM₁₀ e PM_{2.5} (24 h) apresentaram elevada conformidade em relação aos padrões menos restritivos (normas brasileiras e USEPA). No entanto, o percentual de conformidade caiu em comparação aos limites mais restritivos da UE (92,3% para PM₁₀) e OMS (88,8% e 71,6% para PM₁₀ e PM_{2.5}, respectivamente) (Tabela 9).

Tabela 9 – Percentual de conformidade das concentrações de poluentes monitorados em 9 estações automáticas de qualidade do ar na Região Vale do Rio Doce do estado de Minas Gerais (dados de 2023)**Table 9** - Percentage of compliance for the concentrations of monitored pollutants at 9 automatic air quality monitoring stations in the Vale do Rio Doce Region of the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA nº 506/2024 - PI-2	Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM ₁₀	24 horas	99,8%	99,9%	92,3%	100%	88,8%
	Anual	100%	100%	100%	*	0%
Material Particulado - PM _{2.5}	24 horas	100%	100,0%	*	99,8%	71,6%
	Anual	100%	100%	100%	0%	0%
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	100%	100%	100%	#	100%
	Anual	100%	100%	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora	100%	100%	100%	100%	100%
	Anual	100%	100%	100%	100%	0%
Ozônio - O ₃	8 horas	99,0%	99,2%	98,7%	99,2%	96,1%

Monóxido de Carbono - CO	8 horas	100%	100%	100%	100%	100%
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	100%	100%	*	*	*
	Anual	100%	100%	*	*	*

* reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa;

O valor é referente a um período de 1 hora.

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Por outro lado, não foram registradas conformidades das médias aritméticas anuais aos padrões mais restritivos da USEPA ($9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$) e OMS ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} e $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$) (Tabela 9). De fato, os valores médios registrados para esses parâmetros foram mais elevados que esses limites, ou seja, $29,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} e $12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$ (Tabela 10).

Tabela 10 – Estatística descritiva das concentrações de poluentes monitorados em 9 estações automáticas de qualidade do ar na Região Vale do Rio Doce do estado de Minas Gerais (dados de 2023)

Table 10 - Descriptive statistics on the concentrations of monitored pollutants at 9 automatic air quality monitoring stations in the Vale do Rio Doce region of the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Nº dados	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Material Particulado - PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2.259	29,2	26,3	6,7	163	13,3
Material Particulado - $\text{PM}_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2.437	12,9	12,2	2,0	44,0	5,0
Dióxido de Enxofre - SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.358	2,2	2,1	0,02	14,9	1,4
Dióxido de Nitrogênio - NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.553	27,5	24,4	2,3	91,8	12,5
Ozônio - O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.466	58,6	54,9	16,0	194	20,4
Monóxido de Carbono - CO (ppm)	1.411	0,37	0,34	0,06	1,5	0,17
Partículas Totais em Suspensão - PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.608	43,5	38,6	10,1	235	21,5

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Com relação ao SO_2 , tanto as medições diárias quanto anuais mostraram 100% de conformidade com os padrões nacionais e internacionais disponíveis (Tabela 9), com valor médio de $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e valor máximo registrado de $14,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 10). Apesar das normas internacionais não indicarem padrões anuais para

esse poluente, os resultados indicam baixa ocorrência de episódios críticos de poluição por SO₂ na região.

As medições de NO₂ atingiram 100% de conformidade para todas as normas analisadas, exceto em relação ao padrão anual da OMS, com nenhum resultado conforme (Tabela 9), sendo o padrão mais restritivo de todos (10 µg/m³, Tabela 2). O valor médio registrado para NO₂ foi de 27,5 µg/m³ e valor máximo foi de 91,8 µg/m³ (Tabela 10).

Para o O₃ (8 h), a conformidade foi elevada, variando de 99,2%, a 96,1% (OMS) (Tabela 9), refletindo a similaridade entre os padrões das normas estudadas (Tabela 2).

Os resultados de CO (8 h) mostraram-se bem abaixo do padrão indicado nas normas estudadas (9 ppm, Tabela 2; Tabela 9), com valor médio de 0,37 ppm e máximo de 1,5 ppm (Tabela 10).

A conformidade com relação às PTS foi de 100% para as normas nacionais, tanto em medições diárias quanto médias aritméticas anuais (Tabela 9).

Na Região Metropolitana, os resultados de PM₁₀ e PM_{2,5} (24 h) apresentaram elevada conformidade em relação aos padrões menos restritivos (normas brasileiras e USEPA). No entanto, o percentual de conformidade caiu em comparação aos limites mais restritivos da UE (89,3% para PM₁₀) e OMS (85,8% e 82,7% para PM₁₀ e PM_{2,5}, respectivamente) (Tabela 11).

Tabela 11 – Percentual de conformidade das concentrações de poluentes monitorados em 29 estações automáticas de qualidade do ar na Região Metropolitana do estado de Minas Gerais (dados de 2023)

Table 11 - Percentage of compliance with monitored pollutant concentrations at 29 automatic air quality monitoring stations in the Metropolitan Region of the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA nº 506/2024 - PI-2	Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM ₁₀	24 horas	99,4%	99,8%	89,3%	100%	85,8%
	Anual	80,8%	88,5%	88,5%	*	0%
Material Particulado - PM _{2,5}	24 horas	100%	100%	*	99,8%	82,7%
	Anual	95,2%	100%	100%	33,3%	0%
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	99,7%	100%	100%	#	99,7%
	Anual	100%	100%	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora	100%	100%	100%	100%	100%
	Anual	100%	100%	72,7%	100%	0%
Ozônio - O ₃	8 horas	97,3%	98,6%	95,9%	98,3%	90,3%
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	100%	100%	100%	100%	100%
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	99,5%	99,5%	*	*	*
	Anual	86,7%	86,7%	*	*	*

* reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa;

O valor é referente a um período de 1 hora.

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Por outro lado, o percentual de conformidade das médias aritméticas anuais ao padrão mais restritivo da USEPA caiu drasticamente para o $PM_{2,5}$ (33,3%) e o padrão da OMS para os dois parâmetros não foi atingido (Tabela 11). Os valores médios registrados para esses parâmetros foram mais elevados que esses limites (Tabela 2), sendo $28,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} e $10,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2,5}$ (Tabela 10).

Tanto as medições diárias quanto anuais de SO_2 mostraram elevada conformidade com os padrões nacionais e internacionais disponíveis (acima de 99%, Tabela 11), com valor médio de $4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e valor máximo registrado de $69,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 12). Apesar das normas internacionais não indicarem padrões anuais para esse poluente, os resultados indicam baixa ocorrência de episódios críticos de poluição por SO_2 na região.

Tabela 12 – Estatística descritiva das concentrações de poluentes monitorados em 29 estações automáticas de qualidade do ar na Região Metropolitana do estado de Minas Gerais (dados de 2023)

Table 12 - Descriptive statistics on the concentrations of monitored pollutants at 29 automatic air quality monitoring stations in the Metropolitan Region of the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Nº dados	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Material Particulado - PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9.062	28,4	23,9	0,92	149	17,5
Material Particulado - $PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	7.198	10,5	9,5	0,94	76,9	5,4
Dióxido de Enxofre - SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2.946	4,8	3,8	0,06	69,2	5,2
Dióxido de Nitrogênio - NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3.706	35,7	32,3	0,38	166	18,9
Ozônio - O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3.972	62,3	56,5	7,0	210	27,8
Monóxido de Carbono - CO (ppm)	2.710	0,72	0,60	0,06	6,7	0,55
Partículas Totais em Suspensão - PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.074	53,3	43,3	4,1	384	36,4

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

As medições de NO_2 atingiram 100% de conformidade para todas as normas analisadas, exceto em relação aos padrões anual da UE e OMS, com 72,2% e 0% de conformidade, respectivamente (Tabela 11). O valor médio registrado para NO_2 foi de $35,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e valor máximo foi de $166 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 12).

Para o O_3 (8 h), a conformidade foi elevada, variando de 98,6%, a 90,3% (OMS) (Tabela 11), refletindo similaridade entre os padrões das normas estudadas (Tabela 2). O valor médio registrado para O_3 foi de $62,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e valor máximo foi de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 12).

Os resultados de CO (8 h) mostraram-se bem abaixo do padrão indicado nas normas estudadas (9 ppm, Tabela 2; Tabela 11), com valor médio de 0,72 ppm e máximo de 6,7 ppm (Tabela 12).

A conformidade com relação às PTS foi de acima de 99% (24 h) e 86% (médias anuais) em relação às

normas nacionais (Tabela 11). O valor médio registrado foi de 53,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e o valor máximo foi de 384 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 12).

3.3 Análise da conformidade das concentrações de poluentes atmosféricos em Minas Gerais com os padrões de qualidade do ar estudados

Para o PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ (24 h), os resultados apresentaram elevada conformidade em relação aos padrões menos restritivos (normas brasileiras e USEPA). No entanto, o percentual de conformidade caiu em comparação aos limites mais restritivos da UE (90,3% para PM_{10}) e OMS (86,7% e 82,9% para PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$, respectivamente) (Tabela 13).

Tabela 13 – Percentual de conformidade das concentrações de poluentes monitorados em 52 estações automáticas de qualidade do ar do estado de Minas Gerais (dados de 2023)

Table 13 - Percentage of compliance with the concentrations of monitored pollutants at 52 automatic air quality monitoring stations in the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA nº 506/2024 - PI-2	Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM_{10}	24 horas	99,6%	99,9%	90,3%	100%	86,7%
	Anual	83,0%	87,2%	87,2%	*	0%
Material Particulado - $\text{PM}_{2,5}$	24 horas	100%	100%	*	99,8%	82,9%
	Anual	97,1%	100%	100%	37,1%	0%
Dióxido de Enxofre - SO_2	24 horas	99,8%	100%	100%	#	99,8%
	Anual	100%	100%	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO_2	1 hora	100%	100%	100%	100%	100%
	Anual	100%	100%	80,0%	100%	0%
Ozônio - O_3	8 horas	97,8%	98,7%	96,7%	98,5%	91,9%
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	100%	100%	100%	100%	100%
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	99,7%	99,7%	*	*	*
	Anual	92,6%	92,6%	*	*	*

* reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa;

O valor é referente a um período de 1 hora.

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Por outro lado, o percentual de conformidade das médias aritméticas anuais ao padrão mais restritivo da USEPA caiu drasticamente para o $\text{PM}_{2,5}$ (37,1%) e o padrão da OMS para os dois parâmetros não foi atingido (Tabela 13). Os valores médios registrados para esses parâmetros foram mais elevados que esses limites

(Tabela 2), sendo 28,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} e 10,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ (Tabela 10).

Tanto as medições diárias quanto anuais de SO_2 mostraram elevada conformidade com os padrões nacionais e internacionais disponíveis (acima de 99%, Tabela 13), com valor médio de 4,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e valor máximo registrado de 69,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 14). Apesar das normas internacionais não indicarem padrões anuais para esse poluente, os resultados indicam baixa ocorrência de episódios críticos de poluição por SO_2 na região.

Tabela 14 – Estatística descritiva das concentrações de poluentes monitorados em 52 estações automáticas de qualidade do ar do estado de Minas Gerais (dados de 2023)

Table 14 - Descriptive statistics on the concentrations of monitored pollutants at 52 automatic air quality monitoring stations in the state of Minas Gerais (2023 data)

Poluente	Nº dados	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Material Particulado - PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15.979	28,5	24,4	0,92	163	16,2
Material Particulado - $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	12.231	10,5	9,5	0,94	76,9	5,2
Dióxido de Enxofre - SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	4.304	4,0	3,0	0,02	69,2	4,5
Dióxido de Nitrogênio - NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.259	33,2	29,7	0,38	166	17,7
Ozônio - O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.438	61,3	55,9	7,0	210	26,1
Monóxido de Carbono - CO (ppm)	4.121	0,60	0,51	0,47	6,7	0,47
Partículas Totais em Suspensão - PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8.944	50,4	42,5	4,1	384	32,6

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

As medições de NO_2 atingiram 100% de conformidade para todas as normas analisadas, exceto em relação aos padrões anual da UE e OMS, com 80,0% e 0% de conformidade, respectivamente (Tabela 13). O valor médio registrado para NO_2 foi de 33,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e valor máximo foi de 166 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 14).

Para o O_3 (8 h), a conformidade foi elevada, variando de 98,7%, a 91,3% (OMS) (Tabela 13), refletindo a similaridade entre os padrões das normas estudadas (Tabela 2). O valor médio registrado para O_3 foi de 61,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e valor máximo foi de 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 14).

Os resultados de CO (8 h) mostraram-se bem abaixo do padrão indicado nas normas estudadas (9 ppm, Tabela 2; Tabela 13), com valor médio de 0,60 ppm e máximo de 6,7 ppm (Tabela 14).

A conformidade com relação às PTS foi de acima de 99% (24 h) e 92% (médias anuais) em relação às normas nacionais (Tabela 13). O valor médio registrado foi de 50,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e o valor máximo foi de 384 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 14).

3.4 Discussão geral: qualidade do ar, saúde pública e meio ambiente em Minas Gerais

Os resultados indicaram que o monitoramento da qualidade do ar no estado de Minas Gerais não é uniforme, com regiões dispondo de poucas estações e de número limitado de parâmetros, como a Região Norte e a Noroeste, e a Região Metropolitana concentrando o maior número de estações e de parâmetros monitorados. Essa desigualdade não é exclusiva de Minas Gerais: estudos anteriores já apontaram que a cobertura do monitoramento da qualidade do ar no Brasil é limitada e concentrada nos grandes centros urbanos, o que compromete a capacidade de diagnóstico e o efetivo controle da poluição do ar no país (Boari, Pedruzzi e Vieira-Filho, 2023; Vormittag et al., 2021). Essa lacuna tem implicações que vão além da ausência de dados: regiões com poucas estações, como o Norte e o Noroeste de Minas, tornam-se também menos visíveis para a formulação de políticas de saúde ambiental, para a fiscalização de fontes emissoras e para a priorização de investimentos em controle da poluição, o que pode agravar desigualdades regionais já existentes na proteção da saúde da população e na conservação dos ecossistemas locais.

Foi evidenciado elevado percentual de atendimento aos padrões menos restritivos dos parâmetros analisados, especialmente aos determinados pelas normas brasileiras. Estudos em outros estados também revelaram elevada conformidade em relação aos padrões nacionais (Sousa et al., 2024; Silva Júnior et al., 2020). Esse padrão de alta conformidade deve, no entanto, ser interpretado com cautela: como os limites nacionais partem de valores intermediários mais permissivos (PI-1 e PI-2) em direção aos Padrões Finais, a elevada conformidade reflete, em boa medida, o baixo grau de exigência da própria norma vigente, e não necessariamente uma condição de qualidade do ar segura para a saúde da população. Na literatura, há consenso de que a Resolução CONAMA nº 506/2024, apesar de recentemente publicada, ainda é considerada desatualizada e permissiva quanto aos prazos para atendimento aos PFs alinhados às diretrizes de 2021 da OMS (Buralli; Connerton, 2025; Cevolani et al., 2024; Boari, Pedruzzi e Vieira-Filho, 2023).

No estado de Minas Gerais, há dificuldade em atender aos padrões mais restritivos para o PM_{10} , o $PM_{2.5}$ e o NO_2 , especialmente aos padrões anuais da OMS. Resultados semelhantes foram reportados por Peláez et al. (2020) e Ribeiro, Galvão e Albuquerque (2023) em estudos na Região Metropolitana de Belo Horizonte referentes a anos anteriores a 2023, o que sugere um padrão persistente de exposição crônica na região, e não um evento pontual associado a 2023. Essa persistência é preocupante porque os limites anuais, diferentemente dos de curto prazo, foram concebidos justamente para refletir o efeito cumulativo da exposição prolongada, mesmo a concentrações moderadas, que a literatura associa a maior risco de doenças respiratórias crônicas, cardiovasculares e mortalidade prematura (WHO, 2021). Estudos conduzidos em áreas urbanas brasileiras já demonstraram essa associação de forma direta: na região metropolitana de Belo Horizonte, Gouveia et al. (2019) relacionaram o aumento nas concentrações de poluentes atmosféricos a maior número de óbitos e internações por causas respiratórias e cardiovasculares; resultados semelhantes foram reportados em Rio Branco (Coker et al., 2022) e em outras regiões metropolitanas brasileiras (Andreão et al., 2020; Brum et al., 2025). Em escala global, estima-se que a exposição à poluição atmosférica ambiente esteja associada a milhões de mortes prematuras por ano, majoritariamente por doenças não transmissíveis (Pozzer et al., 2023), com expressivos custos econômicos e sociais associados à mortalidade prematura, inclusive nas capitais brasileiras (Rocha, Morais e Klug, 2019). Assim, a não conformidade sistemática aos padrões anuais de PM_{10} , $PM_{2.5}$ e NO_2 verificada neste estudo não deve ser considerada apenas um indicador de desempenho regulatório, mas como um sinal de exposição continuada da população mineira, sobretudo na Região Metropolitana de Belo Horizonte, a um risco à saúde já bem documentado na literatura nacional e internacional.

Além dos efeitos sobre a saúde humana, a exposição contínua a concentrações elevadas de material particulado tem consequências diretas sobre o meio ambiente, aspecto que uma análise direcionada à conformidade normativa não é capaz de indicar. O depósito de partículas sobre as folhas reduz a incidência de luz e obstrui os estômatos, comprometendo a fotossíntese e o crescimento vegetal (Gheorghe; Ion, 2011), efeito potencialmente relevante para Minas Gerais dada a baixa conformidade de PM_{10} e $PM_{2.5}$ aos padrões anuais mais restritivos discutida anteriormente.

Nas regiões que monitoram os níveis de SO_2 , O_3 e CO (Vale do Rio Doce e Metropolitana), foram registradas elevadas conformidades em relação às diretrizes da OMS (acima de 99% para SO_2 , de 90% para O_3 e de 100% para CO). Peláez et al. (2020) reportaram que concentrações diárias de SO_2 ficaram abaixo das diretrizes da OMS, entre 2010 e 2017, em diversas cidades de grande porte da América do Sul, incluindo Belo Horizonte. Ribeiro, Galvão e Albuquerque (2023) reportaram que as concentrações de O_3 permaneceram, na maior parte do tempo, entre 70 e 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no período de 1995 a 2022. Já para o PM_{10} e o $\text{PM}_{2.5}$, a maior dificuldade de conformidade concentrou-se justamente nessas duas regiões, que reúnem as principais fontes emissoras do estado: a Região Metropolitana concentra a maior frota veicular e os principais polos industriais de Minas Gerais, enquanto o Vale do Rio Doce contém um dos maiores complexos de mineração e siderurgia do país, na região conhecida como Vale do Aço, onde estudos locais já identificaram concentrações elevadas de material particulado associadas a essas atividades (Queiroz et al., 2020). Essa coincidência espacial entre as regiões de maior número de fontes móveis e industriais e as de menor conformidade aos padrões de PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$ indica que o controle dessas fontes específicas, e não apenas o ajuste dos padrões regulatórios, é necessário para a melhoria efetiva da qualidade do ar nessas regiões.

O caso do O_3 é distinto e merece discussão à parte, ainda que os resultados deste estudo tenham indicado elevada conformidade desse poluente ao padrão da OMS nas regiões monitoradas. Isso ocorre porque os padrões de qualidade do ar para o O_3 comparados neste estudo protegem a saúde humana com base em picos de curto prazo, ou seja, na máxima média móvel de 8 horas no dia. Com relação ao dano à vegetação por ozônio, ela é de natureza cumulativa, dependendo da dose total de exposição acima de um limiar ao longo da estação de crescimento. A própria Diretiva 2008/50/EC da União Europeia, já utilizada neste estudo como fonte do padrão de saúde para O_3 , estabelece separadamente um valor-alvo específico para a proteção da vegetação, expresso pelo indicador AOT40 (European Commission, 2008), reconhecendo que a conformidade com o padrão de saúde não é suficiente para avaliar o risco ecológico desse poluente. Do ponto de vista biológico, o ozônio é considerado um dos poluentes mais fitotóxicos, gerando espécies reativas de oxigênio que danificam tecidos foliares e proteínas fotossintéticas, com reflexos na produtividade agrícola e florestal (Gheorghe; Ion, 2011); em florestas tropicais, estima-se que o ozônio troposférico de origem antrópica já reduza, em média, 5,1% a produtividade primária líquida, com perdas de até 9,6% nas espécies mais sensíveis, comprometendo também sua capacidade de sequestro de carbono (Cheesman et al., 2024). Esse aspecto é particularmente relevante para Minas Gerais, dada a expressiva atividade agrícola do estado e a presença de remanescentes significativos de Cerrado e Mata Atlântica. No entanto, os dados deste estudo não permitem avaliá-lo adequadamente, pois o O_3 foi monitorado apenas nas regiões Metropolitana e do Vale do Rio Doce. Para as demais regiões do estado, justamente aquelas com maior cobertura vegetal remanescente e vocação agrícola, não há informação sobre os níveis desse poluente. Vale ressaltar que o ozônio pode atingir concentrações elevadas em determinados períodos e regiões, dado seu caráter secundário e sua formação fotoquímica a partir de precursores que se dispersam para além dos centros urbanos. Assim, a elevada conformidade de O_3 verificada nas duas regiões monitoradas não permite inferir a situação nas demais regiões do estado, reforçando a necessidade de ampliar o monitoramento desse poluente não apenas como instrumento de proteção à saúde pública, mas também de conservação ambiental.

O PTS é um parâmetro monitorado em quatro das cinco regiões estudadas, apresentando elevada conformidade em relação às normas brasileiras (acima de 99% para médias diárias e 92% para médias anuais). Conforme mencionado, a manutenção desse parâmetro reflete, em parte, a desatualização do sistema de monitoramento no estado e no Brasil, uma vez que não há padrões internacionais correspondentes e o PTS tem sido substituído pelo monitoramento das frações mais finas (PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$) em diversos países (Vormittag et al., 2021). Ainda assim, o monitoramento de PTS tem utilidade, pois indica partículas maiores associadas a atividades de mineração, construção civil e queima de biomassa. Desta forma, o PTS permanece relevante como indicador de fontes locais específicas, sobretudo no Vale do Rio Doce e na Região Metropolitana, ainda que não substitua a necessidade de expandir o monitoramento das frações finas, mais associadas a efeitos

adversos à saúde.

4. Conclusão

Este estudo comparou os padrões de qualidade do ar das normas brasileiras (nacional e estadual) com os padrões da UE, dos EUA e as diretrizes da OMS, avaliando, para o estado de Minas Gerais, a conformidade das concentrações de PM_{10} , $PM_{2,5}$, SO_2 , NO_2 , O_3 , CO e PTS medidas em 52 estações automáticas de monitoramento distribuídas em cinco regiões, com dados de 2023. Os resultados confirmam que os padrões nacional e estadual, mesmo após a recente atualização promovida pela Resolução CONAMA nº 506/2024, permanecem mais permissivos que os padrões internacionais, sobretudo em relação às diretrizes da OMS, evidenciando uma defasagem regulatória que se reflete diretamente na proteção conferida à saúde da população e ao meio ambiente do estado.

A cobertura do monitoramento da qualidade do ar no estado mostrou-se heterogênea, concentrando o maior número de estações e de parâmetros monitorados na Região Metropolitana de Belo Horizonte, enquanto regiões como Norte e Noroeste de Minas dispõem de poucas estações e monitoram um número reduzido de poluentes. Como discutido, essa limitação de cobertura, já registrada em outros estudos sobre o cenário brasileiro, restringe a capacidade de diagnóstico da qualidade do ar em parte significativa do território mineiro e compromete a identificação de eventuais riscos à saúde pública e aos ecossistemas locais nessas regiões, devendo ser considerada prioritária nas próximas etapas de expansão da rede estadual.

Quanto à conformidade, evidenciou-se um padrão duplo entre os poluentes avaliados, que acompanha a distribuição espacial das principais fontes emissoras do estado. Os parâmetros PM_{10} , $PM_{2,5}$ e NO_2 , mais associados às fontes móveis e industriais concentradas na Região Metropolitana e no Vale do Rio Doce, apresentaram elevado atendimento aos limites brasileiros e da USEPA, mas dificuldade generalizada em atender aos padrões anuais da OMS, não atendidos em nenhuma das regiões avaliadas, resultado consistente com estudos anteriores conduzidos na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Em contrapartida, SO_2 , O_3 e CO , monitorados apenas nas regiões Metropolitana e do Vale do Rio Doce, revelaram conformidade superior a 90% mesmo frente às diretrizes mais restritivas da OMS. O PTS, parâmetro sem padrão internacional correspondente, manteve conformidade elevada (acima de 92%) em relação às normas brasileiras, ainda que sua permanência na regulação nacional reflita, em parte, a desatualização do sistema regulatório frente a poluentes já substituídos pelo PM_{10} e pelo $PM_{2,5}$ nas normas internacionais.

Esse padrão de não conformidade do PM_{10} , do $PM_{2,5}$ e do NO_2 anual reflete a exposição crônica a esses poluentes, e está associada, na literatura nacional e internacional, a maior incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, a mortalidade prematura e a custos econômicos e sociais, além de efeitos sobre a vegetação, a produtividade agrícola e a capacidade de sequestro de carbono de remanescentes florestais. Ou seja, os resultados aqui apresentados mostram não apenas uma defasagem normativa, mas uma exposição real e contínua da população e dos ecossistemas mineiros a riscos que a literatura já identificou como significativos.

Diante desse cenário, recomenda-se priorizar a identificação e o controle das fontes emissoras de PM_{10} , $PM_{2,5}$ e NO_2 , especialmente das fontes móveis e industriais concentradas na Região Metropolitana de Belo Horizonte e no polo de mineração e siderurgia do Vale do Aço, na região do Vale do Rio Doce. Recomenda-se, ainda, investir na ampliação e modernização da rede de monitoramento nas regiões menos cobertas, como o Norte e o Noroeste de Minas, de modo a reduzir a desigualdade de informação identificada neste estudo e subsidiar tanto a vigilância em saúde ambiental quanto a conservação dos ecossistemas dessas regiões. Por fim, recomenda-se que futuras revisões da legislação brasileira de qualidade do ar incorporem cronogramas mais próximos das diretrizes de 2021 da OMS, de modo a reduzir a defasagem regulatória identificada neste estudo e ampliar a proteção da saúde e do meio ambiente da população mineira.

Como limitação, destaca-se que a avaliação de conformidade adotada neste estudo baseou-se em valores máximos absolutos, e não nas formas de atendimento por percentis trianuais ou excedências controladas previstas para os padrões de curto prazo da USEPA, da UE e da própria OMS, o que pode ter subestimado a

conformidade em relação a essas legislações. Essa limitação, no entanto, não compromete o resultado mais importante deste estudo: o não atendimento aos padrões anuais da OMS para PM₁₀, PM_{2,5} e NO₂, já que esses padrões não admitem excedências em nenhuma das normas comparadas, o que torna a avaliação por valor máximo absoluto equivalente ao critério de conformidade estabelecido pela própria OMS. Estudos futuros que incorporem as formas específicas de atendimento previstas para os padrões de curto prazo, bem como a expansão do monitoramento de O₃ e SO₂ para as demais regiões do estado, poderão aprofundar a compreensão dos riscos à saúde pública e ao meio ambiente associados à qualidade do ar em Minas Gerais.

5. Referências

- Amaral, C. H. C., Rêgo, R. C. F., & Northcross, A. L. (2023). Comparação dos padrões de qualidade do ar entre o Brasil e países dos cinco continentes. **Sustainability in Debate**, 14(3), 234-245. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v14n3.2023.50459>
- Andreão, W. L., Pinto, J. A., Pedruzzi, R., Kumar, P., & Albuquerque, T. T. A. (2020). Quantifying the impact of particulate matter on mortality and hospitalizations in four Brazilian metropolitan areas. **Journal of Environmental Management**, 270, 110840. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110840>
- Baird, C., & Cann, M. (2011). **Química ambiental** (M. T. Grassi et al., Trad., 4a ed.). Bookman.
- Beloconi, A., & Vounatsou, P. (2023). Revised EU and WHO air quality thresholds: Where does Europe stand? **Atmospheric Environment**, 314, 120110. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120110>
- Boari, A., Pedruzzi, R., & Vieira-Filho, M. (2023). Air pollution trends and exceedances: Ozone and particulate matter outlook in Brazilian highly urbanized zones. **Environmental Monitoring and Assessment**, 195, 1058. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11654-3>
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental. (2019). **Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar**. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-projetos-acoes-obras-atividades/agendaambientalurbana/ar-puro/guia-tecnico-para-qualidade-do-ar>. Acesso em: 03/01/2025.
- BRASIL. **Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Revoga os arts. 1º ao 8º, os arts. 12 a 14 e o Anexo I da Resolução Conama nº 491, de 19 de novembro de 2018; e os itens 2.2.1 e 2.3 da Resolução Conama nº 5, de 15 de junho de 1989.** Diário Oficial da União, seção 1, 5 de julho de 2024a.
- BRASIL. **Lei nº 14.580, de 2 de maio de 2024. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar.** Diário Oficial da União, 3 de maio de 2024b.
- Brum, A. N., Brum, R. L., Bonifácio, A. S. et al. (2025). Two decades of air pollution: Health impacts in the metropolitan area of Porto Alegre, Brazil. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 22, 10401-10414. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06300-5>
- Buralli, R. J., & Connerton, P. (2025). Poluição do ar, saúde e regulação no Brasil: estamos avançando? **Cadernos de Saúde Pública**, 41(3), e00172924. <https://doi.org/10.1590/0102-311XPT172924>
- Carvalho, H. (2021). New WHO global air quality guidelines: More pressure on nations to reduce air pollution levels. **The Lancet Planetary Health**, 5(11), e760-e761.

Cheesman, A. W., Brown, F., Artaxo, P., Farha, M. N., Folberth, G. A., Hayes, F. J., Heinrich, V. H. A., Hill, T. C., Mercado, L. M., Oliver, R. J., O'Sullivan, M., Uddling, J., Cernusak, L. A., & Sitch, S. (2024). Reduced productivity and carbon drawdown of tropical forests from ground-level ozone exposure. **Nature Geoscience**, 17(10), 1003-1007. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01530-1>

Cevolani, K. T., Lugon, L., Goulart, E. V., & Santos, J. M. (2024). Influence of distinct mobility scenarios on NO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ street-level concentrations: A case study in a Brazilian urban neighborhood. **Atmospheric Pollution Research**, 15, 102126. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102126>

Coker, E. S., Buralli, R., Manrique, A. F., Kanai, C. M., Amegah, A. K., & Gouveia, N. (2022). Association between PM_{2.5} and respiratory hospitalization in Rio Branco, Brazil: Demonstrating the potential of low-cost air quality sensor for epidemiologic research. **Environmental Research**, 214, 113738. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113738>

EUROPEAN COMMISSION. (2008). **Directive 2008/50/EC**. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0050>. Acesso em: 12/03/2026.

Gheorghe, I. F., & Ion, B. (2011). The effects of air pollutants on vegetation and the role of vegetation in reducing atmospheric pollution. In **The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources**. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/17660>

Gouveia, N., Leon, A. P., Junger, W., Lins, J. F., & Freitas, C. U. (2019). Poluição do ar e impactos na saúde na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, 24(10), 3773-3781. <https://doi.org/10.1590/1413-812320182410.29432017>

Le, L. T., Quang, K. B. V., Vo, T. V., Nguyen, T. M. T., Dao, T. V. H., & Bui, X. T. (2024). Environmental and health impacts of air pollution: A mini review. **Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering**, 66(1), 120-128. [https://doi.org/10.31276/VJSTE.66\(1\)120-128](https://doi.org/10.31276/VJSTE.66(1)120-128)

Lode, B., Schönberger, P., & Toussaint, P. (2016). Clean air for all by 2030? Air quality in the 2030 agenda and in international law. **RECIEL**, 25, 27-38. <https://doi.org/10.1111/reel.12151>

MINAS GERAIS. (2022). **Geografia: localização geográfica**. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/pagina/geografia>. Acesso em: 18/01/2025.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). **Deliberação Normativa nº 248, de 23 de novembro de 2023. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar para o Estado de Minas Gerais e dá outras providências**. Diário do Executivo, Belo Horizonte, 2023.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. (2024). **Dados do monitoramento contínuo da qualidade do ar**. Disponível em: <https://meioambiente.mg.gov.br/w/-dados-do-monitoramento-continuo-da-qualidade-do-ar>. Acesso em: 03/01/2025.

MINAS GERAIS. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA). (2025). **Mesorregiões [Shapefile]**. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 03/01/2025.

Nazarenko, Y., Pal, D., Dwivedi, S., & Ariya, P. A. (2025). Air quality standards and WHO's guidance on

- particulate matter measuring 2.5 μm (PM_{2.5}). **Bulletin of the World Health Organization**, 103, 71-72. <https://doi.org/10.2471/BLT.23.290522>
- Peláez, L. M. G., Santos, J. M., Albuquerque, T. T. A., Reis, N. C., Andreão, W. L., & Andrade, M. F. (2020). Air quality status and trends over large cities in South America. **Environmental Science & Policy**, 114, 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.009>
- Pozzer, A., Anenberg, S. C., Dey, S., Haines, A., Lelieveld, J., & Chowdhury, S. (2023). Mortality attributable to ambient air pollution: A review of global estimates. **GeoHealth**, 7(1), e2022GH000711. <https://doi.org/10.1029/2022GH000711>
- Queiroz, M. T. A., Carvalho, B. L., Cardeal, J. A. C., & Borges, T. L. P. (2020). Aspectos da poluição atmosférica: análise da qualidade do ar em Coronel Fabriciano e Timóteo, MG, Brasil. **Revista Gestão Industrial**, 16(1), 204-223. <https://doi.org/10.3895/gi.v16n1.11768>
- Ribeiro, A. K. C., Galvão, E. S., & Albuquerque, T. T. A. (2023). Air quality characterization and trend analysis in a Brazilian industrialized metropolitan area in the period from 1995 to 2022. **Atmosphere**, 14, 1792. <https://doi.org/10.3390/atmos14121792>
- Rocha, G., Morais, R. L. de, & Klug, L. (2019). **O custo econômico da poluição do ar: Estimativa de valor da vida estatística para o Brasil** (Texto para Discussão nº 2517). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9469/1/td_2517.pdf
- Silva Júnior, F. M. R., Honscha, L. C., Brum, R. L., Ramires, P. F., Tavella, R. A., Fernandes, C. L. F., Penteado, J. O., Bonifácio, A. S., Volcão, L. M., Santos, M., & Coronas, M. V. (2020). Air quality in cities of extreme south of Brazil. **Ecotoxicology and Environmental Contamination**, 15(1), 61-67. <https://doi.org/10.5132/eec.2020.01.08>
- Sousa, A. S., Gois, G., Paiva, R. F. P. S., Pimentel, L. C. G., Terassi, P. M. B., Sobral, B. S., & Muniz, M. A. (2024). Impacts of urban emissions and air quality in São Paulo State, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, 196(433), 1-29.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. (2024a). **Overview of the Clean Air Act and air pollution**. Disponível em: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview>. Acesso em: 16/03/2026.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. (2024b). **NAAQS table**. Disponível em: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>. Acesso em: 12/03/2026.
- Velasco, R. P., & Jarosińska, D. (2022). Update of the WHO global air quality guidelines: Systematic reviews — An introduction. **Environment International**, 170, 107556. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107556>
- Vormittag, E. M. P. A., Cirqueira, S. S. R., Neto, H. W., & Saldiva, P. H. N. (2021). Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, 35(102), 7-30. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>
- WHO – World Health Organization. (2005). **Air quality guidelines: global update 2005. Report on a working group meeting**. Bonn, Germany.

WHO – World Health Organization. (2021). **WHO global air quality guidelines**. Geneva: WHO. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>. Acesso em: 12/03/2026.

Zhang, X., Wei, Y., Wang, T., Shen, J., Zhao, T., & Dong, L. (2025). Spatial correlation network on synergy between carbon reduction and pollution control in key areas for air pollution prevention and control. **Journal of Cleaner Production**, 491, 144777. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144777>