



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Análise de Dados Secundários de Poluição Atmosférica no Município de Itabira, Minas Gerais

Rodolfo Montalvão¹ e Ana Carolina Vasques Freitas²

¹ Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Rua Irmã Ivone Drumond, 200 – Distrito Industrial II, Itabira – MG, Minas Gerais. rodolfo_montalvao22@unifei.edu.br, ORCID: 0009-0009-8349-0255.

² Professora Dra., Instituto de Ciências Puras e Aplicadas (ICPA), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Rua Irmã Ivone Drumond, 200 – Distrito Industrial II, Itabira – MG, Minas Gerais. ana.freitas@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0002-2633-2607.

Artigo recebido em 17/05/2024 e aceito em 22/08/2025

RESUMO

Um aumento significativo da poluição atmosférica vem sendo observado em todo mundo ao longo dos anos, resultando em doenças respiratórias e cardiovasculares. A falta de uma ampla rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil é muitas vezes suprida por meio da utilização de dados secundários, os quais precisam ser validados para a garantia da confiabilidade dos mesmos. Assim, este estudo avaliou a concentração estimada de poluentes atmosféricos no município de Itabira, Minas Gerais, no período de 2010 a 2019. A análise foi realizada com base nos dados disponibilizados pelo Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM). Para verificar o nível de acurácia desses dados, as concentrações de Material Particulado (MP) e as condições meteorológicas, monitoradas pela rede de qualidade do ar municipal, foram utilizadas para fins de comparação e validação. Os resultados apontam que os dados do SISAM tendem a subestimar as concentrações de MP inalável fino e a superestimar os valores de temperatura e umidade. Apesar disso, a temperatura foi a variável que apresentou a maior similaridade com os dados da rede de monitoramento, com correlação de aproximadamente 0,8. A análise de outros poluentes não monitorados demonstrou a necessidade de controle da poluição veicular e da prática de queimadas, com especial destaque para o período de estiagem com a formação de poluentes secundários. Conclui-se que a validação de dados secundários de poluição atmosférica é essencial para garantir a precisão e a confiabilidade das informações compartilhadas com o público e os responsáveis pela tomada de decisões. Palavras-chave: Qualidade do ar; Saúde Pública; Validação de dados; Condições Meteorológicas; Mineração.

Analysis of Secondary Air Pollution Data in the Municipality of Itabira, Minas Gerais

ABSTRACT

A significant increase in atmospheric pollution has been observed worldwide over the years, resulting in respiratory and cardiovascular diseases. The lack of a comprehensive air quality monitoring network in Brazil is often addressed through the use of secondary data, which must be validated to ensure their reliability. Thus, this study evaluated the estimated concentration of atmospheric pollutants in the municipality of Itabira, Minas Gerais, from 2010 to 2019. The analysis was carried out based on the Environmental Information System Integrated to Environmental Health (SISAM) dataset. To verify the level of accuracy of these data, Particulate Matter (PM) concentrations and meteorological conditions, monitored by the municipal air quality network, were used for comparison and validation purposes. The results indicated that SISAM data tend to underestimate fine inhalable PM concentrations and overestimate temperature and humidity values. Despite of it, temperature was the variable that showed the greatest similarity to the monitoring network data, with a correlation of approximately 0.8. The analysis of other unmonitored pollutants highlighted the need for controlling vehicular pollution and the practice of open burning, especially during the dry season, when secondary pollutants form. It is concluded that the validation of secondary atmospheric pollution data is essential to ensure the accuracy and reliability of the information shared with the public and decision-makers.

Keywords: Air quality; Public health; Data validation; Meteorological conditions; Mining

Introdução

A poluição atmosférica representa uma preocupação recorrente e significativa, e está diretamente associada aos grandes e médios centros urbanos, onde percebe-se uma notável expansão demográfica e territorial, acompanhada por um aumento substancial do setor industrial.

Um poluente atmosférico é descrito como uma substância presente na atmosfera, derivada tanto de fontes naturais, mas, predominantemente, de origem antropogênica, cuja acumulação em níveis elevados desencadeia efeitos adversos à saúde do ser humano, assim como sobre a flora e fauna (Santos, Reis Júnior & Galvão, 2022). Adicionalmente, tais substâncias podem acarretar danos aos materiais de valor social, contribuindo para perturbações no equilíbrio ecológico, hidrológico e físico do ecossistema terrestre (Fatima *et al.*, 2020).

Conforme estabelecido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb, [s.d.]), os poluentes atmosféricos são categorizados com base em sua origem, composição e, em seu estado físico; assim, o termo Material Particulado (MP) é utilizado para descrever um conjunto de poluentes compostos por partículas de poeira, fumaça e outras substâncias sólidas e líquidas de dimensões reduzidas, que permanecem em suspensão na atmosfera devido ao seu tamanho diminuto. Sabe-se que o MP figura como um dos principais agentes desencadeadores de comorbidades na saúde humana, sendo uma preocupação recorrente para os órgãos ambientais em todo o mundo (Gonçalves, Rodrigues & Ribeiro, 2023). Na atmosfera, o MP afeta a visibilidade e a radiação, interferindo diretamente na formação de nuvens e, portanto, afetando o regime hidrológico e os padrões climáticos em regiões específicas (Inomata & Matsuki, 2023).

Atualmente, a poluição atmosférica figura como um dos principais determinantes associados a óbitos e morbidades, estando diretamente associada ao aumento do risco e da vulnerabilidade da população em desenvolver doenças cardiovasculares, neoplasias pulmonares, bem como problemas respiratórios crônicos e agudos (Santos, Reis Júnior & Galvão, 2022).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) relata que uma média de aproximadamente sete milhões de pessoas morrem todos os anos de doenças relacionadas à deterioração da qualidade do ar (OPAS, 2021). Portanto, é claro que a poluição se tornou um dos maiores problemas enfrentados pela sociedade, trazendo consequências negativas para os ecossistemas

terrestres e aquáticos, assim como impactando a saúde, a sociedade e a economia de forma geral (Manisalidis *et al.*, 2020).

No que tange aos impactos econômicos, um relatório emitido no ano de 2020 apontou que a poluição atmosférica causa um dano significativo na economia mundial, cerca de 2,9 trilhões de dólares, o que representa aproximadamente 3,3% do PIB mundial (André, Vormittag & Saldiva, 2020). Portanto, é possível afirmar que o monitoramento e o controle da qualidade do ar desempenham um papel crucial, pois subsidiam o desenvolvimento de políticas públicas que visam garantir a preservação da qualidade do ar.

Contudo, apesar da importância do monitoramento da qualidade do ar, no ano de 2014, foi realizado um estudo através do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), em estreita colaboração com os órgãos ambientais estaduais e com o apoio do Ministério do Meio Ambiente (MMA), que destacou uma notável limitação da rede de vigilância ambiental no território nacional, sinalizando a urgente necessidade de reestruturação do Programa Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar (Pronar) (IEMA, 2014).

Paralelamente, no mesmo período, o Instituto de Saúde e Sustentabilidade (ISS) contribuiu com uma análise minuciosa da rede de monitoramento da qualidade do ar no país, a partir de revisões das informações disponíveis nos sites eletrônicos dos órgãos ambientais. Este estudo revelou que apenas 1,7% dos municípios brasileiros são cobertos pelo sistema de monitoramento atmosférico, sendo que apenas uma parcela dos estados disponibiliza publicamente informações sobre a qualidade do ar monitorada e alguns estados das regiões Norte e Centro-Oeste se abstêm de realizar o monitoramento, alegando ausência de poluição em seus territórios (ISS, 2014).

No entanto, considerando a dispersão da poluição e o fato de que o Brasil é um país com vasto território e diversidade regional, além de diferentes regimes hidrológicos, é de extrema relevância considerar as diversas fontes de poluição atmosférica presentes, incluindo a queima de combustíveis fósseis para geração de energia no setor de transportes (Vormittag *et al.*, 2021).

Atualmente, a maioria das pesquisas voltadas para a qualidade do ar e poluição atmosférica está intrinsecamente ligada aos impactos na saúde humana. Devido a deficiência na cobertura da rede de monitoramento da qualidade

do ar, vários estudos, como o de Viana *et al.* (2021) e Romero (2023), têm utilizado os dados provenientes do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM, [s.d.]). Esta plataforma é o resultado de uma parceria entre a Fundação Oswaldo Cruz - Fiocruz, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Ministério da Saúde (MS) e a Organização Pan-Americana de Saúde (OPAS/OMS). Os dados disponibilizados pela plataforma do SISAM combinam o monitoramento remoto de focos de queimadas, estimativas das emissões decorrentes dessas queimadas, bem como as emissões urbanas e industriais, através de um sistema integrado de modelagem numérica para previsão da qualidade do ar. Este sistema de informações visa aprimorar os programas de vigilância da saúde ambiental.

Pelo fato dos dados do SISAM se constituírem em estimativas das emissões atmosféricas é crucial verificar se os mesmos são capazes de representar o que está sendo de fato medido nas redes de monitoramento municipais, quando esses dados observados estão disponíveis. Caso contrário, isso pode comprometer as análises realizadas e resultar na disseminação de informações imprecisas, prejudicando a compreensão dos efeitos da poluição atmosférica na saúde da população.

Neste cenário, este estudo tem como objetivo avaliar a concentração estimada de poluentes atmosféricos no município de Itabira, Minas Gerais, no período de 2010 a 2019. A análise será realizada com base nos dados disponibilizados pelo SISAM, com o intuito de identificar padrões de concentração e possíveis fontes emissoras. Para verificar o nível de acurácia desses dados, as concentrações de MP e as condições meteorológicas, monitoradas pela rede de qualidade do ar municipal, serão utilizadas para fins de comparação e validação.

O município de Itabira dispõe de quatro estações de monitoramento da qualidade do ar e uma estação meteorológica. Embora a atividade mineradora seja a principal fonte emissora de poluentes atmosféricos no município, existem outros poluentes, além do material particulado, que não estão sendo, atualmente, monitorados. Estes poluentes podem representar riscos à saúde e o conhecimento sobre a contribuição de suas fontes emissoras é imprescindível para subsidiar políticas públicas que permitam garantir a saúde da população.

Segundo Alves e Freitas (2021), as atividades humanas desempenham um papel significativo na alteração da qualidade do ar. De acordo com os autores, em Itabira, observou-se um crescimento contínuo da frota de veículos ao longo do tempo, além da ocorrência de queimadas e a presença de um distrito industrial localizado ao sudeste da cidade, o que também pode contribuir para o aumento dos níveis de poluentes. Somam-se a isso os poluentes transportados a longas distâncias, provenientes de regiões vizinhas, que alcançam o município (Freitas, Belardi & Barbosa, 2022).

O estudo de Matos, Freitas e Silva (2023) evidenciou que a população de Itabira enfrenta incômodos relacionados à poluição atmosférica, especialmente devido à presença de poeira, opacidade e fumaça no ar. A pesquisa também identificou impactos da poluição do ar no cotidiano dos moradores, como a necessidade de realizar limpeza frequente nas residências para remover a poeira acumulada, além do aumento de problemas respiratórios crônicos em determinados períodos do ano.

Material e métodos

Área de Estudo

O município de Itabira, localizado no Estado de Minas Gerais (Figura 1), está a uma distância aproximada de 109 km a nordeste da capital, Belo Horizonte. Sua população é estimada em 121.717 habitantes e apresenta extensão territorial de 1.253,704 km², segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022).

Itabira faz divisa com nove municípios, sendo eles: João Monlevade, São Gonçalo do Rio Abaixo, Bom Jesus do Amparo, Nova União, Jaboticatubas, Itambé do Mato Dentro, Santa Maria de Itabira, Nova Era e Bela Vista de Minas, sendo referência para os municípios vizinhos em aspectos socioeconômicos.

A principal atividade econômica de Itabira é a extração e processamento do minério de ferro, fazendo parte do chamado Quadrilátero Ferrífero, por apresentar grandes reservas minerais. A empresa Vale S.A. (anteriormente conhecida como Companhia Vale do Rio Doce) começou suas operações no município em 1942, quando iniciou a exploração em larga escala do minério de ferro (Machado, 2023).

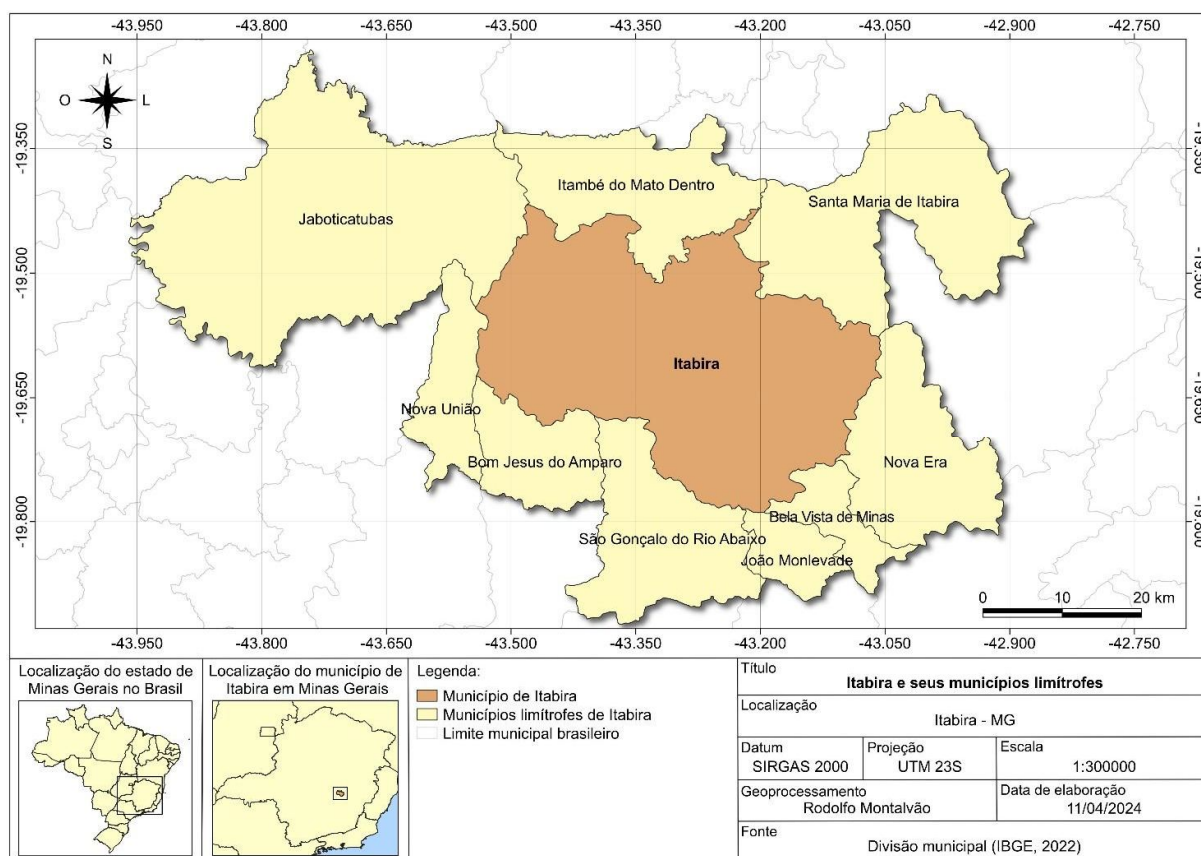


Figura 1. Localização do município de Itabira-MG e seus municípios limítrofes.

Dados da Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar

Atualmente, o município de Itabira possui quatro Estações Automáticas de Monitoramento do Ar (EAMAs), que são mantidas pela companhia Vale S.A e são destinadas a monitorar as partículas inaláveis grossas ($<10\mu\text{m}$ - MP_{10}), as partículas inaláveis finas ($<2,5\mu\text{m}$ - $\text{MP}_{2,5}$) e as partículas totais em suspensão ($<50\mu\text{m}$ - PTS) (ITABIRAR, 2024). Além destas quatro estações (EAMA11, EAMA21, EAMA31 e EAMA41), também há uma estação meteorológica (EM11).

Os dados das EAMAs estão disponíveis no Portal ItabirAR para o período de 2010 até o

presente momento. Contudo, os dados $\text{MP}_{2,5}$ só passaram a ser disponibilizados a partir do dia 16 de outubro de 2020.

A localização das estações é indicada na Figura 2. É importante salientar que o monitoramento é ininterrupto, gerando médias horárias durante 24 h por dia, por meio dos amostradores em tempo real da Rupprecht & Patashnick Série 1400a, os quais são aprovados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (ITABIRAR, 2024).

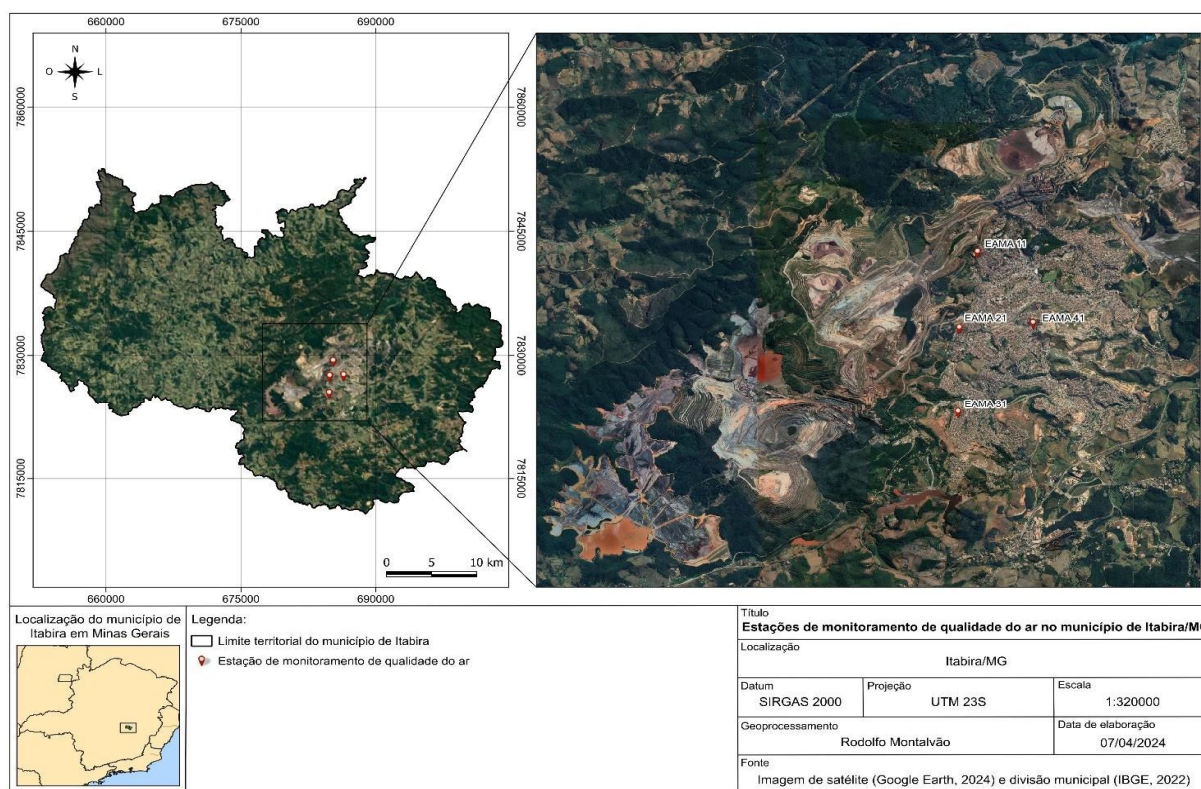


Figura 2. Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar de Itabira-MG.

A estação EAMA11 encontra-se no bairro Vila Paciência, já a estação EAMA21 localiza-se na praça do Areão, enquanto a EAMA31 está no bairro João XXIII e, finalmente, a EAMA41 se encontra no bairro São Marcos (Figura 2). As EAMAs se localizam a uma altitude de 769 m (EAMA11), 727 m (EAMA21), 643 m (EAMA31) e 808 m (EAMA41).

Coleta de Dados e Análises

Os dados da plataforma do SISAM foram obtidos para o período de 2010 a 2019. Como mencionado anteriormente, a plataforma do SISAM representa uma ferramenta sofisticada para a análise de dados pontuais e espaciais, fornecendo informações referentes às concentrações de poluentes derivadas de estimativas de emissões de queimadas e de fontes urbanas/industriais, bem como dados de monitoramento de focos de queimadas e registros meteorológicos anteriores.

Assim sendo, o SISAM permite a disponibilização de dados meteorológicos e de poluentes atmosféricos, de 2000 até 2019, para todos os municípios do Brasil (SISAM, [s.d.]), podendo auxiliar nos programas de saúde, pois permite que sejam elaborados estudos dos impactos dos poluentes na saúde humana.

Os dados do SISAM estão disponíveis apenas em 4 horários (0, 6, 12 e 18 h), enquanto que os dados da rede municipal são horários. Assim, primeiramente, foram calculadas as médias diárias, mensais e anuais desses dados para o período de 2010 a 2019.

Em virtude da disponibilidade dos dados observados de $MP_{2,5}$ na rede de monitoramento municipal ser somente a partir de 16 de outubro de 2020 e da ausência de dados estimados de MP_{10} no SISAM, fez-se necessário criar uma série histórica de $MP_{2,5}$ utilizando os dados observados de MP_{10} para o período de 2010 a 2019. Considerando que o $MP_{2,5}$ está contido no MP_{10} , foi possível derivar a série histórica do $MP_{2,5}$ através da determinação do fator de conversão entre esses dois poluentes ($MP_{2,5}/MP_{10}$), isto é, a razão de um em relação ao outro. Tal estratégia é sugerida pela OMS para locais desprovidos de monitoramento específico do MP fino (WHO, 2022).

Assim sendo, os dados de $MP_{2,5}$ e MP_{10} foram comparados nos anos de 2021 e 2022, a fim de obter a razão média de emissão entre esses dois poluentes ($MP_{2,5}/MP_{10}$). Após a obtenção deste fator ou razão de emissão, foi possível gerar a série histórica de $MP_{2,5}$ a partir da multiplicação da série de MP_{10} no período de 2010 a 2019 pelo fator de

conversão. Foi realizada também a média das concentrações de $MP_{2,5}$ medidas nas quatro EAMAs. Esses dados observados foram então comparados a série histórica de $MP_{2,5}$ disponível no SISAM, para verificar o nível de acurácia. A comparação também foi feita em relação aos dados meteorológicos, especificamente, precipitação, temperatura, umidade, direção e velocidade do vento.

Para realizar a validação dos dados, foi empregada algumas ferramentas estatísticas, como análise de correlação, bias e raiz do erro médio quadrático (*Root Mean Squared Error - RMSE*, em inglês). O viés ou bias representa a média dos erros individualizados, servindo para identificar se há subestimativa ou superestimativa média de valores estimados (Costa, 2019). Desse modo, é possível afirmar que se o bias for igual a zero, não há erro sistemático ou tendência no conjunto de dados estimados. Contudo, caso o valor seja positivo ou negativo significam superestimativas ou subestimativas, respectivamente.

O bias foi calculado através da equação 1:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S - O) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde a incógnita “S” corresponde aos valores estimados (dados do SISAM), enquanto “O” representa os dados observados nas EAMAs, e a incógnita “n” diz respeito ao tamanho da série temporal considerada. No caso deste estudo, a série temporal é de dez anos, respectivamente.

O RMSE foi utilizado para verificar a conformidade das estimativas dos dados do SISAM em relação aos dados observados, conforme equação 2 a seguir, no qual a incógnita “S” corresponde aos valores estimados pelo SISAM, enquanto a incógnita “O” representa os dados observados das EAMAs, resultando na Raiz do Erro Médio Quadrático.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (\text{Equação 2})$$

No caso dos dados de velocidade e direção do vento, foi empregado o software WRPlot para elaborar e comparar as rosas dos ventos entre os dados do SISAM e da rede municipal de Itabira-MG.

O programa WRPlot é uma ferramenta de visualização e análise e proporciona uma representação gráfica das informações relativas à direção e velocidade dos ventos, permitindo uma comparação entre os conjuntos de dados

provenientes do SISAM e da rede municipal de Itabira - MG.

Resultados e discussão

Validação dos Dados do SISAM

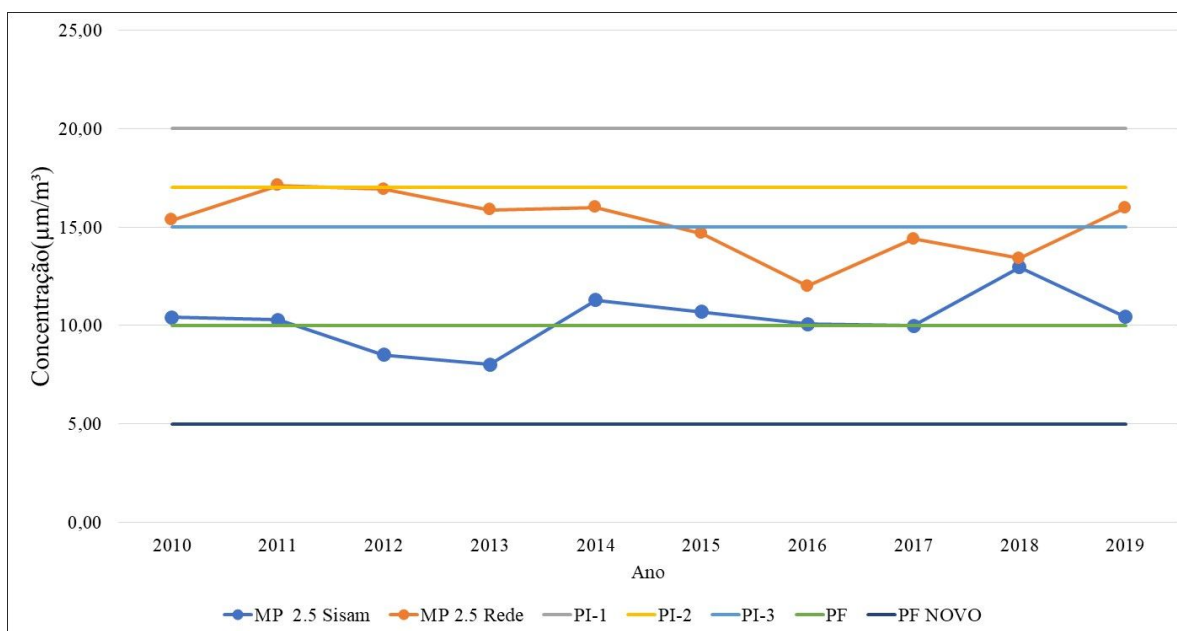
Os poluentes atmosféricos podem ser classificados como primários e secundários, sendo que os primários são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de poluição, predominantemente de origem antropogênica, enquanto os poluentes secundários são formados na atmosfera por meio de reações químicas entre os poluentes primários e os constituintes naturais do ar (Souza *et al.*, 2023). Essa distinção é fundamental para compreender a dinâmica da poluição atmosférica e suas consequências para o meio ambiente e para a saúde pública.

Os níveis de qualidade do ar são definidos por seis poluentes prioritários (Brasil, 2018), por serem mais comumente emitidos e com base em evidências que comprovam seus efeitos adversos à saúde. Estes poluentes, conhecidos como "clássicos", incluem material particulado (MP), Ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e monóxido de carbono (CO) e chumbo (Pb). Além de serem prejudiciais por si só, o controle desses poluentes também pode ter um impacto positivo na redução de outros poluentes nocivos presentes no ar (OPAS, 2021).

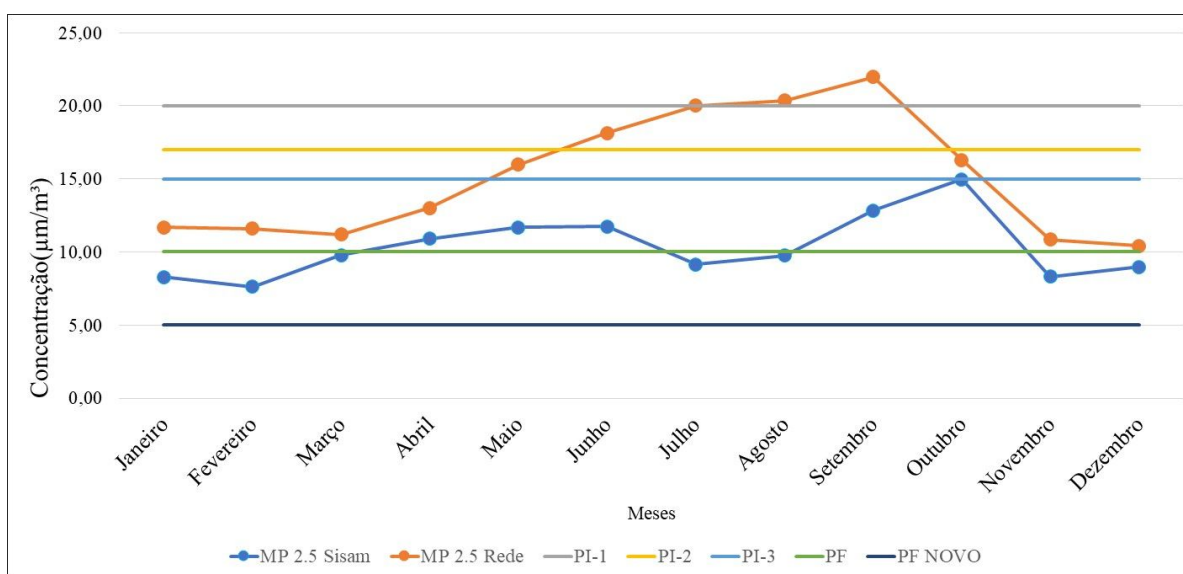
O acervo de dados do SISAM é composto por uma diversidade de variáveis, englobando não somente monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 micrômetros ($MP_{2,5}$), mas também dados relativos a parâmetros meteorológicos, tais como velocidade e direção do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação acumulada, além de dados relacionados à ocorrência de focos de queimadas (SISAM, [s.d.]).

Assim, como mencionado anteriormente, a análise comparativa proposta nesse estudo visa confrontar os dados de material particulado fino ($MP_{2,5}$) e dos parâmetros meteorológicos na região de Itabira - MG, obtidos pela rede municipal, com aqueles provenientes do SISAM, de modo a verificar sua acurácia.

Desse modo, a Figura 3a apresenta o comparativo da concentração média anual do $MP_{2,5}$ de 2010 a 2019. Já a Figura 3b apresenta as concentrações médias mensais de janeiro a dezembro. Tal abordagem permitiu visualizar as diferenças entre as fontes de dados analisadas.



(a)



(b)

Figura 3. (a) concentrações médias anuais e (b) concentrações médias mensais de MP_{2,5} (µg/m³) a partir dos dados do SISAM e da média das quatro EAMAs para o município de Itabira-MG.

Destaca-se que o MP representa um complexo de partículas suspensas no ar, podendo ser originado tanto por emissões diretas, classificadas como primárias, quanto por processos de formação na atmosfera, classificadas como secundárias, como mencionado anteriormente. As fontes primárias de MP abrangem uma variedade de componentes, incluindo fuligem, poeira,

partículas de sal marinho, bem como aquelas provenientes do desgaste de pastilhas de freio e pneus (Morantes, González & Rincón, 2021). Esses materiais são liberados diretamente para a atmosfera por fontes antropogênicas, como veículos automotores, atividades industriais, processos de combustão e atividades de construção e mineração. Por outro lado, o MP secundário é

formado por reações químicas na atmosfera envolvendo dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis (COVs) (Mozaffar *et al.*, 2020)

Considerando as análises realizadas e os dados apresentados na Figura 3a, é possível observar uma variação significativa nos resultados entre as fontes de dados para o período em questão. Os dados provenientes do SISAM apresentam uma concentração média anual inferior em todos os anos em comparação com os dados obtidos pela rede de monitoramento do município de Itabira-MG. Somente no ano de 2018 as concentrações foram praticamente as mesmas.

Comparou-se também o atendimento aos padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - Conama nº 491 de 2018 em relação aos dados do SISAM e a média das concentrações das quatro EAMAs.

A Resolução CONAMA 491/2018 estabeleceu 3 parâmetros intermediários (PI-1, PI-2, PI-3) e um parâmetro final (PF), que representa os valores recomendados pela OMS no ano de 2005. Contudo, em 2021 a OMS revisou o PF, adotando um padrão ainda mais restritivo (aqui denominado de PF NOVO na Figura 3).

No caso do município de Itabira, a deliberação normativa do Conselho Municipal de Defesa e Conservação do Meio Ambiente - Codema estabeleceu padrões de qualidade do ar que seguem os valores de concentração do PI-2 da Resolução CONAMA 491/2018 (Brasil, 2018; Itabira, 2022).

Assim, analisando-se a Figura 3a, pode-se notar que as concentrações médias anuais do MP_{2,5}, durante todo o período analisado, se mantiveram acima dos parâmetros finais recomendados pela OMS, tanto em 2005, quanto em 2021 (PF e PF NOVO). Além disso, somente nos anos de 2015 a 2018 as concentrações médias anuais observadas de MP_{2,5} se mantiveram abaixo do PI-3 (Figura 3a). Pode-se notar na Figura 3b que os meses de agosto e setembro são críticos, se mantendo acima do PI-1 para a média anual, esse resultado já era esperado devido ao regime hidrológico da região.

Em termos de número de ultrapassagens aos padrões da legislação, as concentrações médias diárias do MP_{2,5} no período de 2010 a 2019 ultrapassaram o PI-2 (µg/m³) para a média de 24 horas em 18 dias nos dados do SISAM, o que equivale a cerca de 0,004% dos dias avaliados. No caso da rede do município de Itabira, o número de ultrapassagens foi três vezes menor, totalizando apenas 6 dias, o que representa 0,001% dos dias estudados. Isto indica que, apesar das

concentrações médias mensais e anuais de MP_{2,5} terem sido inferiores aos medidos pela rede de monitoramento (Figura 3), os valores diários apresentaram picos superiores nos dados do SISAM.

Essas discrepâncias entre as fontes de dados podem estar relacionadas às diferenças na forma de obtenção dos dados. No caso das EAMAs, os dados foram obtidos por meio de medições diretas em solo, em pontos específicos da superfície terrestre, enquanto os dados do SISAM se baseiam, primariamente, em medições provenientes de satélites, os quais monitoram vastas áreas geográficas. Assim, as estações em solo acabam capturando apenas uma parte limitada da variabilidade espacial da poluição atmosférica, embora essas medidas sejam consideradas como referência.

Além disso, as diferenças nos métodos de amostragem e nos instrumentos utilizados por satélites e estações em solo podem introduzir viés nos resultados, afetando a precisão das medições. Outro ponto relevante é que o MP_{2,5} não é diretamente medido pelos satélites, os quais captam toda a coluna atmosférica, sendo necessário a execução de cálculos para inferir a concentração do poluente somente no nível da superfície (Handschuh *et al.*, 2022), além disso, as observações por satélite podem ser prejudicadas pela interferência de nuvens e fumaça espessa e pelo tempo de revisita do satélite (resolução temporal), o qual, pode interferir significativamente em eventos críticos de poluição de curta duração (Sorek-Hamer, Chatfield, & Liu, 2020).

De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), a influência de fatores ambientais na realização de medições é um aspecto crucial a ser considerado para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados. Dentre esses fatores, destacam-se a temperatura, a umidade, a presença de poeira, a vibração, as flutuações na tensão de alimentação elétrica, a interferência eletromagnética, entre outros. Esses elementos podem exercer um impacto significativo nos equipamentos de medição e nos procedimentos de coleta de dados, podendo afetar diretamente os resultados obtidos. Portanto, é essencial que tais fatores sejam devidamente monitorados e controlados durante o processo de medição, a fim de minimizar seus efeitos indesejáveis (Inmetro, 2020). Assim, isso significa que as estações em solo também podem apresentar imprecisão nas observações, mas devido ao fato de serem medidas diretas, elas ainda são mais precisas do que as medições indiretas.

No caso das concentrações médias mensais, pode-se notar na Figura 3b que as diferenças entre as fontes de dados são maiores no período de estiagem, quando as concentrações de $MP_{2,5}$ são mais elevadas, acentuando, portanto, as divergências entre os dados do SISAM e da rede municipal. No período chuvoso há uma diminuição na concentração dos poluentes devido ao papel preponderante desempenhado pela precipitação na remoção dos mesmos, por meio do processo denominado de deposição úmida (Roldán-Henao, Hoyos, Herrera-Mejía, & Isaza, 2020). A deposição úmida atmosférica implica na transferência dos poluentes para a superfície terrestre mediante a ocorrência de chuva. Durante este processo, os poluentes atmosféricos dissolvidos nas partículas de água da chuva são capturados e removidos da atmosfera, notadamente

os poluentes solúveis, como compostos de enxofre e nitrogênio, que são transportados pela atmosfera na forma de aerossóis ou gases. A eficácia desse mecanismo de remoção é condicionada à intensidade da precipitação (Andreão *et al.*, 2019). Esses resultados destacam como a precipitação desempenha um papel crucial na regulação dos níveis de poluentes atmosféricos, ilustrando a complexa interação entre as condições meteorológicas e a qualidade do ar.

A Figura 4 mostra o regime de precipitação mensal (mm/mês) no município de Itabira-MG para os anos analisados, corroborando com a Figura 3b, onde os meses de outubro a abril apresentam menores concentrações de $MP_{2,5}$ e menores diferenças entre as fontes de dados, devido ao período chuvoso.

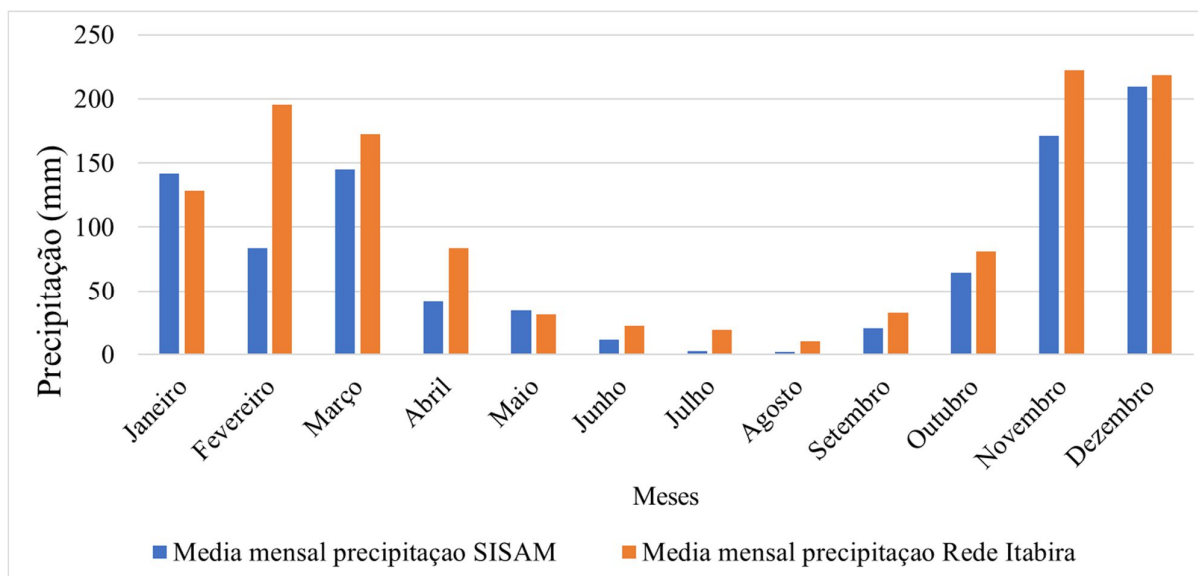


Figura 4. Precipitação média mensal (mm/mês) no município de Itabira-MG para o período analisado (2010-2019) a partir dos dados do SISAM e da EM11.

Por meio da Figura 4 é possível verificar também uma maior similaridade entre as fontes de dados, com exceção dos meses de fevereiro, abril e novembro.

Um alto índice de qualidade do ar constitui um significativo perigo para a saúde humana, bem como para a biodiversidade vegetal e animal. No entanto, alguns fatores climáticos como temperatura, umidade, precipitação entre outros, podem não apenas promover, mas também acelerar reações químicas atmosféricas, amplificando os impactos adversos sobre os sistemas biológicos e ambientais.

Tendo isso em vista, sabe-se que a temperatura é um fator fundamental na formação de alguns poluentes atmosféricos, pois influencia diretamente a química atmosférica, acelerando ciclos específicos e aumentando as emissões de hidrocarbonetos biogênicos e a evaporação de compostos orgânicos voláteis (COVs) sintéticos de veículos (Souza *et al.*, 2023). Um exemplo do favorecimento dessa condição é a formação do Ozônio (O_3), um gás poluente secundário que está presente na atmosfera. Em altas temperaturas, há um estímulo maior nas reações químicas que convertem precursores como óxidos de nitrogênio (NO_x) e COVs em Ozônio, além de proporcionar

uma maior quantidade desses precursores, intensificando, assim, a presença desse poluente na atmosfera (Valdambrini & Ribeiro, 2021).

Portanto, os gases comumente emitidos em ambientes urbanos, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), material particulado (MP₁₀), entre outros, passam por reações químicas que resultam na formação de outros poluentes, como, por exemplo, o Ozônio (O₃). Dentre diversos fatores, a geração de poluentes secundários está sujeita, portanto, à disponibilidade de radiação solar, temperatura e umidade (Zhang *et al.*, 2015). Logo é possível

afirmar que os fatores ambientais são agentes preponderantes para formação de inúmeros gases, pois afetam diretamente a cinética química e física dos componentes, podendo funcionar como catalisador ou inibidor para formação de alguns poluentes na atmosfera.

Assim, a Figura 5 apresenta os valores médios mensais de temperatura (Figura 5a) e umidade (Figura 5b) para o município de Itabira no período analisado a partir dos dados do SISAM e da EM11, pertencente a rede de monitoramento de Itabira.

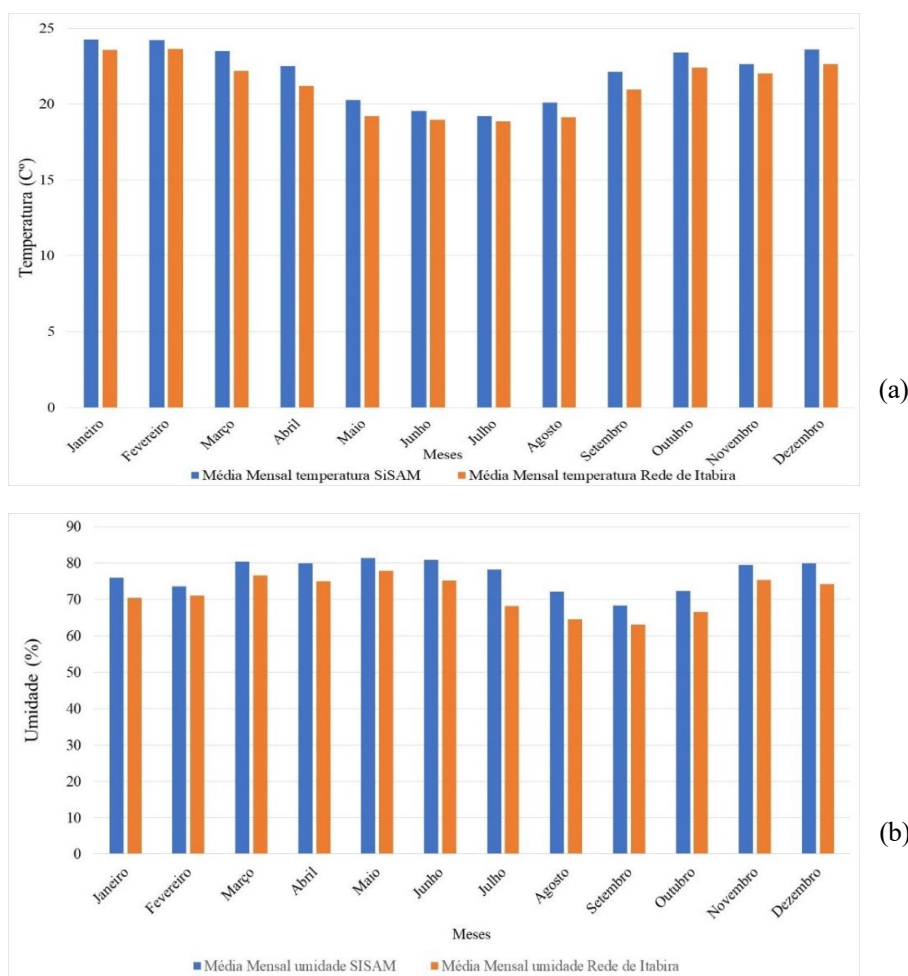


Figura 5. (a) temperatura média mensal (°C) e (b) umidade relativa do ar média mensal (%) no município de Itabira-MG para o período analisado (2010-2019) a partir dos dados do SISAM e da EM11.

Na Figura 5a pode-se notar altas temperaturas durante o período de verão, isto é, entre dezembro e fevereiro, como esperado, e temperaturas mais baixas no período de inverno, entre maio e agosto. Destaca-se que, no caso da temperatura, existem pequenas diferenças entre as fontes de dados, sendo que o SISAM superestimou

os valores de temperatura em todos os meses. Apesar disso, a similaridade entre os dados do SISAM e da rede municipal indica que os dados do SISAM podem ser mais acurados para determinadas variáveis, como temperatura.

Na Figura 5b nota-se que a umidade também apresentou valores similares entre as duas

fontes de dados e, assim como no caso da temperatura, os valores provenientes do SISAM foram superestimados em todos os meses.

Ciente da importância das condições meteorológicas para a qualidade do ar, este estudo também comparou os dados de direção e velocidade dos ventos.

Assim como as demais variáveis climáticas, o vento desempenha um papel crucial na qualidade do ar, especialmente em áreas urbanas, onde a concentração de poluentes é mais elevada devido às indústrias, meios de transporte e atividades antropogênicas intensas, podendo contribuir ou não para a dispersão e diluição desses poluentes, além de promover o transporte dos mesmos para outras regiões (Zhang *et al.*, 2015).

A Figura 6 apresenta as rosas dos ventos para o município de Itabira, representando o padrão de direção e intensidade dos ventos durante o período analisado. Na Figura 6a, pode-se notar que a rosa dos ventos, elaborada com base nos dados da estação meteorológica do município (EM11), apresenta ventos predominantes entre as direções norte (N) e nor-nordeste (NNE). Já na Figura 6b, a rosa dos ventos, elaborada com base nos dados fornecidos pelo SISAM, revela que a direção predominante dos ventos no município é no sentido nordeste (NE).

Em relação à velocidade, a maioria dos ventos apresenta uma velocidade leve nas duas fontes de dados, situando-se entre 2,1 e 3,6 m/s. Contudo, os dados da rede municipal apresentam uma frequência elevada de ventos com velocidade entre 3,6 e 5,7 m/s e entre 5,7 e 8,8 m/s (Figura 6a) em relação aos dados do SISAM. Isso pode ser explicado devido ao fato de que a EM11 se localiza em uma altitude elevada (919 m), onde os ventos são mais intensos e os dados do SISAM consideram o vento em superfície.

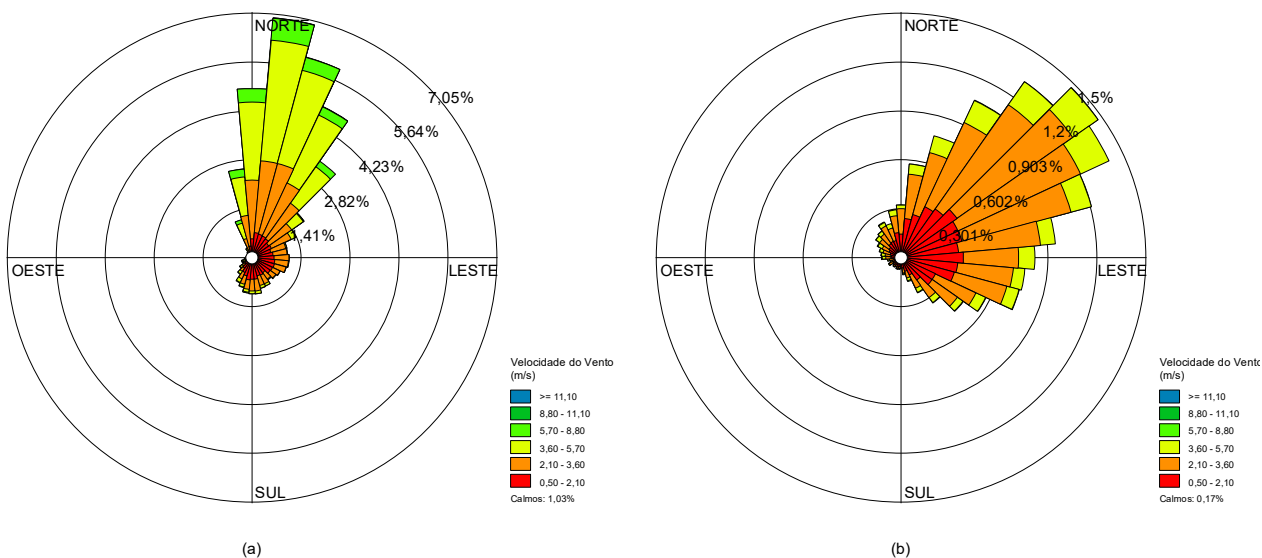


Figura 6. (a) rosa dos ventos a partir dos dados da EM11; (b) rosa dos ventos a partir dos dados do SISAM para o período de 2010-2019.

Análise de Correlação, RMSE e BIAS

A análise de correlação é uma técnica estatística essencial usada para avaliar a relação entre duas variáveis em um conjunto de dados; desse modo, é empregada para identificar e quantificar relacionamentos entre variáveis.

De acordo com Wilks (2011), o valor de correlação varia em uma escala de -1 a 1, sendo que esse valor indica a força e a direção da relação entre as variáveis. Uma correlação próxima de 1 ou -1 sugere uma forte associação entre as variáveis. Uma correlação positiva próxima de 1 indica que as variáveis possuem uma relação direta, enquanto uma correlação negativa próxima de -1 indica que as variáveis têm uma relação inversa, ou seja, quando uma aumenta, a outra tende a diminuir. Em ambos os casos, um valor próximo de 1 ou -1 é geralmente considerado indicativo de uma relação significativa entre as variáveis. Por outro lado, uma correlação próxima de 0 indica uma associação fraca ou nula entre as variáveis. Isso não significa necessariamente que não há relação entre elas, apenas que essa relação não é de dependência direta.

Na Tabela 1 pode-se verificar os valores encontrados para a correlação entre os dados médios diários do SISAM e obtidos a partir da rede municipal de Itabira para os parâmetros de qualidade do ar (MP_{2,5}), e parâmetros meteorológicos (precipitação, temperatura e umidade).

modelo ou fonte de dados de subestimar ou superestimar consistentemente os resultados (Wilks, 2011).

Pode-se verificar na Tabela 1 que o MP_{2,5} apresenta os maiores valores absolutos de bias, sendo que os dados do SISAM apresentam tendência sistemática de subestimar os dados, como também observado na Figura 3. Por outro lado, assim como notado na Figura 5, os dados do SISAM possuem a tendência de superestimar os valores de temperatura e umidade (Tabela 1).

Por fim, a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) é uma métrica fundamental para validação de dados, amplamente utilizada em diversas áreas (Wilks, 2011). Neste trabalho, essa métrica foi aplicada para analisar a conformidade das estimativas dos dados do SISAM. Uma característica importante do RMSE é a sua forma de cálculo, que penaliza mais fortemente os erros maiores. Isso ocorre porque os erros são elevados ao quadrado antes de serem calculados. Portanto, o RMSE é especialmente sensível a valores extremos, uma vez que eles podem contribuir significativamente para o resultado final.

Na Tabela 1 pode-se notar altos valores de RMSE para o MP_{2,5} e para a umidade relativa do ar. No caso do MP_{2,5}, foi verificado anteriormente que os dados do SISAM indicaram um maior número de ultrapassagens aos padrões de qualidade do ar, indicando, que embora as concentrações médias mensais e anuais de MP_{2,5} terem sido inferiores aos medidos pela rede municipal (Figura 3), os valores diários apresentaram picos superiores nos dados do SISAM. Isso se refletiu no valor do

Tabela 1. Análise de correlação, bias e raiz do erro médio quadrático (RMSE) para cada um dos parâmetros analisados.

Parâmetros	Correlação	Bias	RMSE
MP _{2,5}	0,33	-4,76	10,68
Temperatura	0,77	0,22	1,38
Precipitação	0,41	-0,52	6,73
Umidade	0,51	4,38	10,46

Os maiores valores de correlação são verificados para os parâmetros meteorológicos, especialmente temperatura e umidade. Já no caso do MP_{2,5} o valor de correlação foi mais baixo, refletindo as diferenças ilustradas na Figura 3.

Outro parâmetro estatístico importante para validação dos dados do SISAM é o bias. Ele desempenha um papel crucial na avaliação e aprimoramento de modelos estatísticos. O bias ou erro médio refere-se à tendência sistemática de um

RMSE, o qual é sensível a valores extremos. Portanto, as métricas estatísticas empregadas nessa análise de validação dos dados do SISAM corroboram com os resultados encontrados.

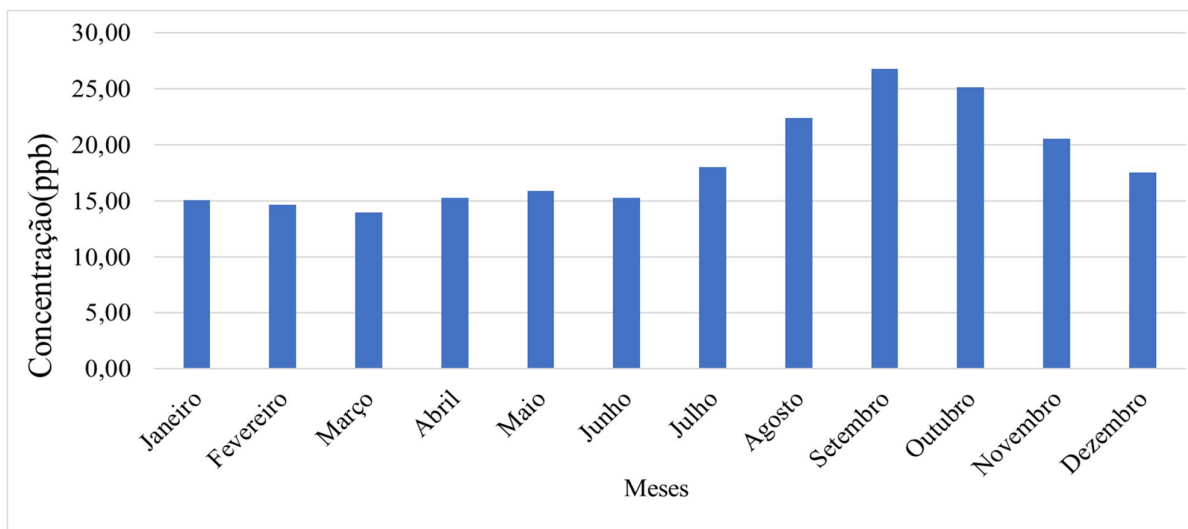
Análise dos Outros Poluentes Atmosféricos

Após a validação dos dados do SISAM, verificou-se que os mesmos subestimaram as concentrações médias anuais e mensais do MP_{2,5}; contudo, o comportamento desse poluente foi

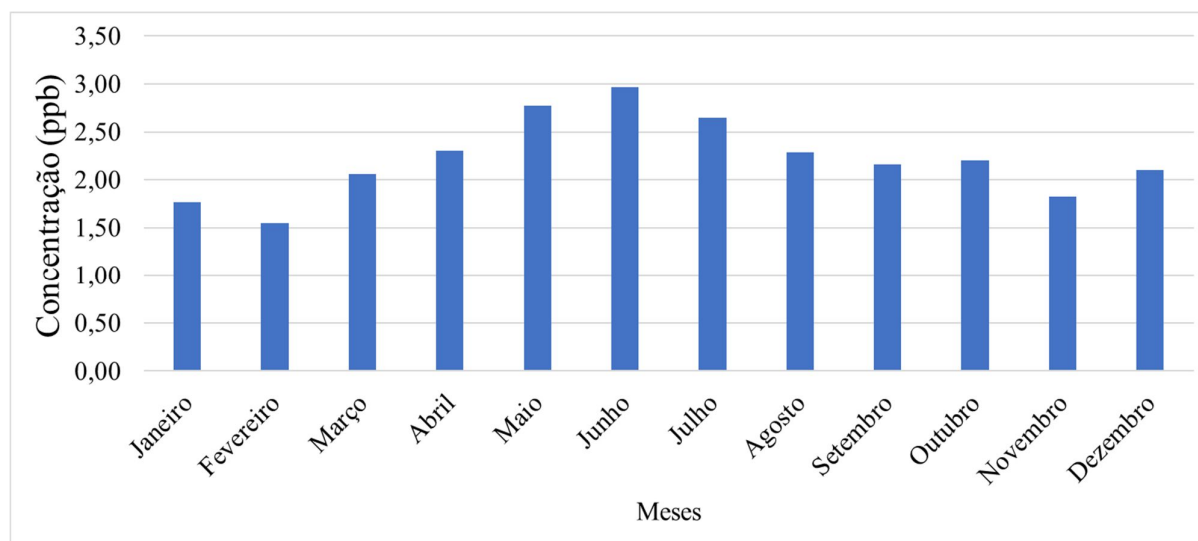
razoavelmente reproduzido com base nos dados das EAMAs, conforme a análise estatística do bias, RMSE e correlação, mostrada anteriormente. Assim, foi feita a análise de outros poluentes atmosféricos não monitorados em Itabira, de modo

a identificar seus padrões e possíveis fontes emissoras.

A Figura 7a representa a concentração média mensal do O_3 e NO_2 em partes por bilhão - (ppb) para os anos estudados no município de Itabira-MG.



(a)



(b)

Figura 7. (a) concentração da média mensal de Ozônio (ppb) e (b) dióxido de Nitrogênio (ppb) para o município de Itabira (2010-2019) a partir dos dados do SISAM.

É possível observar na Figura 7a que as maiores concentrações de ozônio estão presentes no período entre os meses de agosto a novembro, onde as temperaturas tendem a ser mais altas (Figura 5a). É possível observar também que a

maior concentração desse poluente é encontrada no mês de setembro, quando ocorrem poucas chuvas (Figura 4), altas temperaturas e baixa umidade do ar (Figura 5b), dificultando a remoção dos poluentes por deposição úmida. Valdambrini e

Ribeiro (2021) relatam um padrão semelhante a esse no Estado de São Paulo, onde foi observado que as maiores concentrações de Ozônio geralmente ocorreram em dias caracterizados por temperaturas elevadas e baixa umidade relativa do ar.

A Figura 7b mostra as concentrações médias mensais de dióxido de nitrogênio. Esse poluente está diretamente ligado à queima de combustíveis fósseis, e, por consequência, ao tráfego veicular. Além disso, sob uma perspectiva toxicológica, o NO_2 é considerado o mais nocivo dentre os óxidos de nitrogênio, podendo ser um fator determinante para o agravamento de doenças respiratórias, ou a susceptibilidade a patologias pulmonares e infecciosas transmitidas pela via respiratória, como a COVID-19 (Ogen, 2020).

O dióxido de nitrogênio (NO_2) atua como um precursor na formação do ozônio (O_3) na atmosfera terrestre e tal comportamento em zonas urbanas se dá devido a queima incompleta dos combustíveis fósseis, através dos veículos; assim, na presença de uma maior frequência de radiação solar, o NO_2 sofre reações fotoquímicas, levando a formação de Ozônio (Voiculescu *et al.*, 2020).

Na Figura 7b pode-se notar o aumento na concentração do NO_2 no período de estiagem, que abrange os meses entre maio e julho. A concentração do Ozônio, portanto, aumenta nos meses seguintes, indicando que existe um lag entre a presença do NO_2 e a formação do Ozônio, pois para isso é necessário o aumento na intensidade de radiação solar e na temperatura, que começam a ocorrer nos meses seguintes (agosto, setembro e outubro). Portanto, as Figuras 7a e 7b revelam uma correlação consistente entre o aumento da

concentração de NO_2 nos meses de maio a julho e o pico subsequente na concentração de Ozônio ao mesmo tempo que se observa a redução do NO_2 , indicando a conversão de um poluente no outro por meio de reações fotoquímicas. Essa observação sugere uma relação direta entre os níveis de dióxido de nitrogênio e a formação de Ozônio na atmosfera.

Os compostos de enxofre, também, representam uma das categorias ou classe de poluentes atmosféricos. Essas substâncias são largamente emitidas na atmosfera, sobretudo na forma de dióxido de enxofre (SO_2), principalmente devido a atividades antropogênicas. A fonte primária dessas emissões é a queima de combustíveis fósseis, como petróleo, diesel usado por veículos automotores e biomassa, além de atividades industriais (Martins & Andrade, 2002; Brito, Sodré & Almeida, 2018).

Assim como outros gases, o SO_2 também é afetado por parâmetros climáticos, entre eles destacam-se a temperatura, umidade e precipitação (Zhang *et al.*, 2015). Em ambientes com alta concentração de umidade, pode ocorrer a interação das partículas de SO_2 com as moléculas de água, o que pode contribuir para o aumento de seu peso e, consequentemente, de seu tamanho, levando à sua deposição sobre a superfície terrestre. Essa característica pode resultar na diminuição da concentração do poluente na atmosfera. Além disso, a umidade também pode facilitar a remoção do poluente da atmosfera através da deposição úmida, uma vez que o dióxido de enxofre pode ser dissolvido na água, resultando no fenômeno da chuva ácida (Fatima *et al.*, 2020).

A Figura 8 retrata a concentração média mensal do SO_2 (ppb) para o município de Itabira, para os anos analisados.

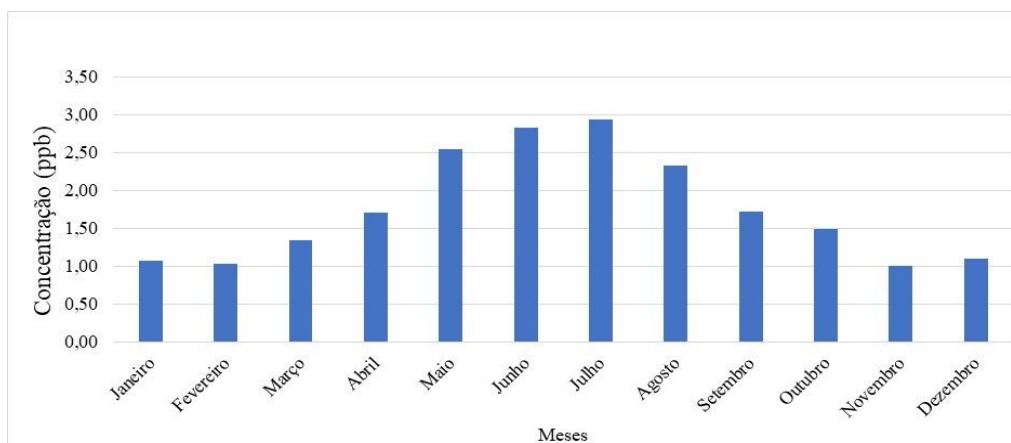


Figura 8. Concentração da média mensal de dióxido de enxofre (ppb) para o município de Itabira (2010-2019) a partir dos dados do SISAM.

É possível observar, assim como no caso do NO_2 , que o regime de chuvas também afeta a concentração de SO_2 , uma vez que as altas concentrações estão presentes na época de estiagem (Figura 8), quando há menor ocorrência de chuva (Figura 4).

Desse modo, é possível afirmar que a precipitação se caracteriza como um dos mais eficientes mecanismos de remoção de gases e material particulado da atmosfera (Belem, Januário, 2023).

O último poluente avaliado nesse estudo é o monóxido de carbono (CO). O CO é um poluente atmosférico de origem principalmente

antropogênica, produzido através da queima incompleta de combustíveis que contêm carbono, destacando-se a gasolina, o diesel e o carvão; porém, também pode ter origem natural, como em incêndios florestais e erupções vulcânicas (Inácio, 2023). Embora erupções vulcânicas não sejam relevantes para o Brasil devido à sua localização no interior da placa tectônica sul-americana, os incêndios florestais podem ser uma fonte significativa.

A Figura 9 retrata a concentração média mensal do CO (ppb) no município de Itabira-MG para os anos estudados.

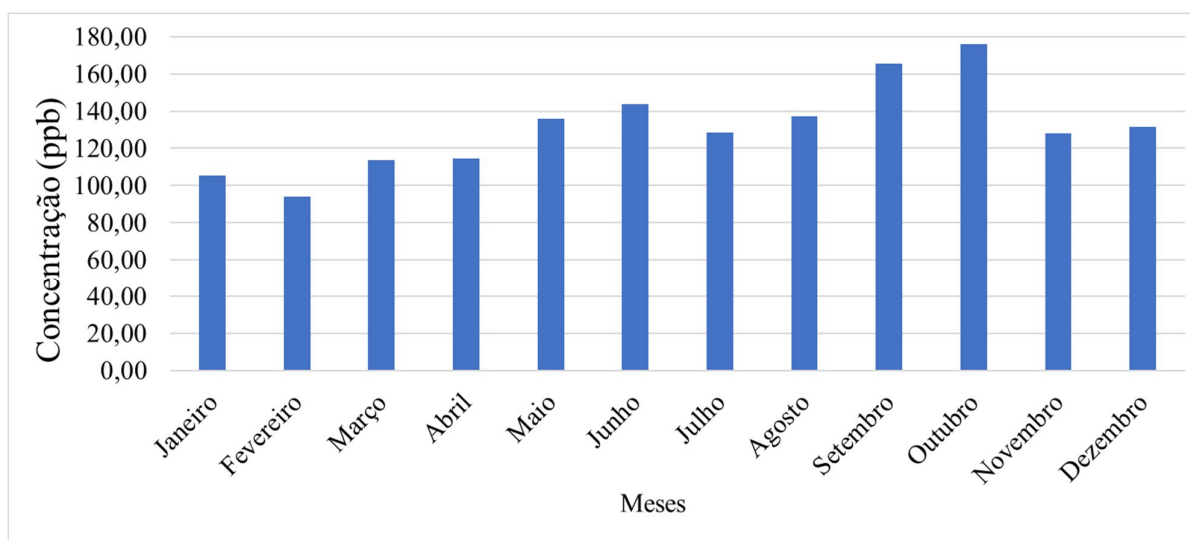


Figura 9. Concentração da média mensal de monóxido de carbono (ppb) para o município de Itabira (2010-2019) a partir dos dados do SISAM.

É possível observar que as maiores concentrações de CO estão presentes nos meses de setembro e outubro (Figura 9), ou seja, no final do período de estiagem, quando a vegetação está seca e propensa ao fogo. Deve-se ressaltar que em Itabira a prática de queimadas é recorrente no período de estiagem, com pico nos meses de setembro e outubro (ITABIRAR, 2024), explicando as altas concentrações de CO nesses meses.

Alves e Freitas (2021) analisaram a influência das condições meteorológicas durante episódios críticos de poluição atmosférica em Itabira, Minas Gerais. Dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA) indicaram que, nos dias com maior poluição, há predominância de anomalias negativas em precipitação, pressão atmosférica, umidade relativa e velocidade do vento, enquanto temperatura,

radiação solar e direção do vento apresentaram anomalias positivas.

Além dos fatores climáticos, foi constatado por Alves e Freitas (2021) um aumento contínuo na frota de veículos desde 2014, com crescimento médio de 1.151 veículos/ano. Outro destaque do estudo foi a ocorrência de 111 focos de queimadas no dia mais crítico analisado, evidenciando a relevância dessas atividades para o agravamento da poluição do ar na região, o que reforça a necessidade de um controle rigoroso das emissões e de um monitoramento contínuo da qualidade do ar, aliado à análise das condições meteorológicas, uma vez que a legislação atual não considera essas variáveis, que podem intensificar os impactos da poluição e comprometer a saúde da população de Itabira.

Nesse contexto, Matos, Freitas e Silva (2023) revelaram uma forte correlação entre o nível

de incômodo da população de Itabira e a qualidade do ar, com 73,5% dos participantes classificando-a como “ruim” ou “péssima”. A percepção de poeira, opacidade e fumaça foi expressiva, sendo a poeira a mais mencionada por sua visibilidade. A análise mostrou que a percepção da qualidade do ar de metade dos entrevistados foi confirmada pelas medições das estações de monitoramento. Os resultados indicaram consequências claras da poluição atmosférica na rotina dos habitantes, como a necessidade de limpeza diária para remoção de poeira e o aumento de problemas respiratórios em determinados períodos do ano. Assim, o estudo evidencia a importância de ampliar a divulgação das ações de monitoramento da qualidade do ar e reforçar o controle da poluição por meio de políticas públicas efetivas, visando proteger a saúde da população e preservar o ambiente.

Por fim, o estudo de Vervloet e Freitas (2024) destaca que a poluição atmosférica em Itabira, causada principalmente pela atividade mineradora, impacta a saúde pública local. Apesar de apresentar concentrações moderadas de material particulado (MP_{10}) entre 2015 e 2022, Itabira registrou altas taxas de internações por doenças respiratórias, sugerindo que fatores como baixos índices de arborização e a presença de outros poluentes podem agravar a situação. A pesquisa reforça a necessidade de regulamentações mais rígidas, monitoramento contínuo e ações de educação ambiental para reduzir as emissões de poluentes e melhorar a qualidade do ar e a saúde da população.

Conclusão

Este trabalho enfatizou a importância vital de se realizar primeiramente a etapa de validação dos dados do Sistema de Monitoramento da Qualidade do Ar (SISAM) antes de utilizá-los para análise dos efeitos da poluição atmosférica na saúde da população. Nesse estudo, verificou-se que os dados do SISAM para o município de Itabira tendem a subestimar as concentrações de $MP_{2,5}$ e a superestimar os valores de temperatura e umidade. Apesar disso, a variável que apresentou a maior similaridade com os dados da rede de monitoramento municipal foi a temperatura, apresentado correlação de aproximadamente 0,8.

A análise de outros poluentes não monitorados em Itabira, demonstrou a necessidade de controle de outras fontes emissoras, como a

poluição veicular e prática de queimadas, com especial destaque para o período de estiagem com a formação de poluentes secundários.

Essas descobertas destacam a complexidade e a sensibilidade das questões relacionadas à qualidade do ar, especialmente no tocante a disponibilidade de dados, o que demanda uma abordagem mais robusta e criteriosa nas análises e na divulgação de resultados para a sociedade. Nesse sentido, portanto, a validação dos dados de fontes secundárias de poluição atmosférica emerge como um passo crítico para garantir a precisão e a confiabilidade, uma vez que estes podem ser utilizados em estudos epidemiológicos e na formulação de políticas públicas voltadas para a proteção do meio ambiente e da saúde humana.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Unifei e da Secretaria Municipal de Meio de Ambiente de Itabira pela disponibilização dos dados para a realização desse trabalho.

Referências

- Alves, H. dos S., & Freitas, A. C. V. (2021). Critical air pollution events analysis in Itabira – Minas Gerais, Brazil. *Research, Society and Development*, 10(1), e51610110587. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.10587>
- André, P. A., Vormittag, E. M., Saldiva, P. H. N. (2020). Avaliação e valoração dos impactos da poluição do ar na saúde da população decorrente da substituição da matriz energética do transporte público na cidade de São Paulo. Greenpeace. Instituto Saúde e Sustentabilidade. 132 p.
- Andreão, W. L., Trindade, B. T., Nascimento, A. P., Reis, N. C., Andrade, M. F., Albuquerque, T. T. D. A. (2019). Influence of Meteorology on Fine Particles Concentration in Vitória Metropolitan Region During Wintertime. *Rev. Bras. Meteorol.* 34, 459–470.
- Belem, J., & Januário, L. (2023). Poluição atmosférica na região da grande vitória e sua relação com a influência meteorológica sazonal. 54 f. Monografia (Bacharel em Química Industrial) - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 491 de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de

- qualidade do ar. Diário oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 19 nov 2018.
- Brito, G. D. S., Sodré, F. F., & Almeida, F. V. (2018). O impacto do material particulado na qualidade do ar. *Revista Virtual de Química*, 10(5), 1335-1354.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Poluentes » Qualidade do Ar. [s.d.]. [https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/#:~:text=Material%20Particulado%20\(MP\)%2C%20Part%20e%20Fuma%C3%A7a%20\(FMC\).](https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/#:~:text=Material%20Particulado%20(MP)%2C%20Part%20e%20Fuma%C3%A7a%20(FMC).)
- Costa E. F. (2019). *Predição da descarga e da capacidade de baterias li-on utilizadas em vans*. 95 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação. Campus de Sobral. Universidade Federal do Ceará, Sobral, CE, Brasil.
- Fatima F., Fatima N., Amjad, T., Anjum, A., Afzal, T., Riaz, J., & Razzaq, H. (2020). 5. A review on acid rain: An environmental threat. *Pure And Applied Biology (PAB)*, 10(1), 301-310. <https://thepab.org/index.php/journal/article/view/1702>.
- Freitas, A. C. V., Belardi, R.-M., & Barbosa, H. de M. J. (2022). Characterization of particulate matter in the iron ore mining region of Itabira, Minas Gerais, Brazil. *Atmosfera*, 35(4), 781–802. <https://doi.org/10.20937/ATM.52987>
- Gonçalves, B. R., Rodrigues, N. B. F., & Ribeiro, C. R. (2023). Poluição atmosférica e saúde humana no estado de São Paulo: uma revisão sistemática de teses e dissertações. *Hygeia: Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde*, 19, e1911. <https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/64677>.
- Handschuh, J., Erbertseder, T., Schaap, M., Baier, F. (2022). Estimating PM2.5 surface concentrations from AOD: A combination of SLSTR and MODIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26, 100716. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100716>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). Itabira (MG). Cidades e Estados. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/itabira.html>.
- IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente. (2014). 1o Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. <http://energiaambiente.org.br/>.
- Inácio, D. C. O. de J. (2023). Quando a intoxicação por monóxido de carbono não mata. Dissertação de mestrado. Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal. <https://hdl.handle.net/10316/111308>.
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia. (2020). NIT-DICLA-021 –Expressão de Incerteza de Medição por Laboratórios de Calibração. Rio de Janeiro.
- ISS - Instituto de Saúde e Sustentabilidade. (2014). Monitoramento da Qualidade do Ar no Brasil. <https://energiaambiente.org.br/plataforma-da-qualidade-do-ar-do-iema-e-fonte-de-dados-brasileiros-de-base-da-oms-20220405>.
- Itabira. Deliberação Normativa CODEMA nº 02, de 15 de agosto de 2022. (2022). Dispõe sobre a operacionalização da proteção ambiental no Município de Itabira, regulando as normas e padrões para a qualidade do ar. https://meioambiente.itabira.mg.gov.br/arquivo/download/245184/categoria/122539/deliberacao_normativa_codema_02_2022
- ITABIRAR. (2024). Boletim Mensal do Monitoramento da Qualidade do Ar, 4(9), 1-36, https://meioambiente.itabira.mg.gov.br/abrir_arquivo.aspx/Boletim_ItabirAR_setembro_2024?cdLocal=2&arquivo={B3B25BBD-AE1E-766B-BE5D-382E0BCE7CB0}.pdf#search=boletim%20itabirar%20setembro%202024 ivo={B3B25BBD-AE1E-766B-BE5D-382E0BCE7CB0}.pdf#search=boletim%20itabirar%20setembro%202024
- Machado, M. P. (2023). *Interações comunicacionais em Itabira em função da expectativa de dois acontecimentos: a exaustão das minas de minério de ferro e o rompimento de barragens de rejeitos*. 227 f. Tese de doutorado em Comunicação Social. Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 8, 505570. DOI 10.3389/fpubh.2020.00014. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32154200/>.
- Matos, C. A., Freitas, A. C. V., & Silva, A. M. L. (2023). Avaliação do nível de incômodo da população de Itabira/MG à poluição atmosférica. *Research, Society and Development*, 12(2), e7312239494-e7312239494.
- Martins, C. R., & Andrade, J. B. D. (2002). Química atmosférica do enxofre (IV): emissões, reações em fase aquosa e impacto ambiental. *Química Nova*, 25, 259-272.
- Morantes, G., González, J.C. & Rincón, G. Characterisation of particulate matter and identification of emission sources in Greater

- Caracas, Venezuela. *Air Qual Atmos Health* 14, 1989–2014
(2021). <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01070-2>
- Mozaffar, A., Zhang, Y. L., Fan, M., Cao, F., & Lin, Y. C. (2020). Characteristics of summertime ambient VOCs and their contributions to O₃ and SOA formation in a suburban area of Nanjing, China. *Atmospheric research*, 240, 104923.
- Ogen, Y. (2020). Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. *Science of the Total Environment*, 726, 138605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138605>.
- OPAS - Organização Pan-Americana da Saúde. (2021). Novas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS visam salvar milhões de vidas da poluição atmosférica. <https://www.paho.org/pt/noticias/22-9-2021-novas-diretrizes-globais-qualidade-do-ar-da-oms-visam-salvar-milhoes-vidas-da>.
- Roldán-Henao, N., Hoyos, C. D., Herrera-Mejía, L., & Isaza, A. (2020). An investigation of the precipitation net effect on the particulate matter concentration in a narrow valley: role of lower-troposphere stability. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(3), 401-426.
- Romero, L. S. (2023). Risco de mortalidade cerebrovascular associado aos efeitos das temperaturas e da qualidade do ar nas capitais brasileiras, 2004-2017. 192p. Tese (Doutorado em Saúde Pública e Meio Ambiente) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro).
- Santos, J. M.; Reis Júnior, N. C.; Galvão, E. S. (2022). (Org.). Material particulado na atmosfera urbana e suas interações com a saúde humana. Goiânia, GO: Alta Performance. 171p.
- SISAM - Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental. INPE/Programa Queimadas. Poluentes e Saúde. <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/sisam/v2/poluentes-saude/>.
- Sorek-Hamer, M., Chatfield, R., Liu, Y. (2020). Review: Strategies for using satellite-based products in modeling PM_{2.5} and short-term pollution episodes. *Environment International*, 144, 106057. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106057>
- Souza, M. C. R. de, Freitas, B. R., Figueiredo, A. P. de S., Venial, H. J., Corradini, P. G., Souza, M. de O. (2023). A Influência dos Compostos Orgânicos Voláteis nas Mudanças Climáticas: Uma breve revisão. *Revista Virtual de Química*, 15(2), 227-240.
- Valdambrini, N. M., & Ribeiro, F. N. D. (2021). Avaliação das Ultrapassagens dos Padrões de Ozônio Troposférico no Estado de São Paulo de 2014 a 2019. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36(4), 735-747.
- Vervloet, H. R., & Freitas, A. C. V. (2024). Análise comparativa da qualidade do ar na região em torno do município de Itabira/MG: Comparative analysis of air quality in the region around the Municipality of Itabira/MG. *Geosciences= Geociências*, 43(3), 475-487.
- Viana, M. V., de Araújo, C. P. M., Oliveira, W. R. R., Santos, E. C., & de Almeida Martins, A. G. L. (2021). Qualidade do ar e suas implicações na saúde da comunidade de Piquiá, Açailândia-MA. *Brazilian Journal of Development*, 7(4), 39885-39895.
- Vormittag, E. da M. P. A. de A., Cirqueira, S. S. R., Wicher Neto, H., & 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/s01034014.2021.35102002>
- Voiculescu, M., Constantin, D. -E., Condurache-Bota, S., Călmuc, V., Roșu, A., & Dragomir Bălănică, C. M. (2020). Role of Meteorological Parameters in the Diurnal and Seasonal Variation of NO₂ in a Romanian Urban Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17), 6228. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176228>
- Zhang, H., Wang, Y., Hu, J., Ying, Q., Hu, X.-M. (2015). Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China. *Environmental Research*, 140, 242-254.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic press.
- WHO. (2022). Atmosférico com preconcentração em coluna de C-18. *Química Nova*, 25, 352-357. <https://doi.org/10.1590/S0100404220020003000003>.