

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
ICIAG**

**MEDIDAS DE $MP_{2,5}$ EM ESCOLAS MUNICIPAIS DE UBERLÂNDIA:
UM ESTUDO PRELIMINAR**

IGOR FERNANDO DOMINGOS

**Uberlândia
2024**

IGOR FERNANDO DOMINGOS

MEDIDAS DE $MP_{2,5}$ EM ESCOLAS MUNICIPAIS DE UBERLÂNDIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof. Dr. Samara Carbone

**Uberlândia
2024**

RESUMO

Esse estudo teve por objetivo avaliar a qualidade do ar dentro de escolas, por meio da quantificação do material particulado ($MP_{2,5}$). Nos últimos anos, os efeitos adversos da poluição atmosférica, especialmente do material particulado (MP), sobre a saúde têm recebido atenção especial. Estudos epidemiológicos identificaram doenças respiratórias relacionadas ao MP em suspensão com diferentes diâmetros aerodinâmicos, destacando-se o $MP_{2,5}$, que atinge as vias respiratórias inferiores, alcançando os brônquios e os alvéolos. A poluição gerada por indústrias, veículos automotores e queima de combustíveis tornou-se um problema sério, com potenciais efeitos adversos à saúde humana, e pesquisas indicam que o MP emitido por diversas fontes está associado ao aumento de sintomas respiratórios na população. Como as crianças em idade escolar passam grande parte do seu tempo nas escolas, os potenciais efeitos adversos dos poluentes emitidos por potenciais fontes de emissão têm sido investigados. Uberlândia, a segunda maior cidade do estado de Minas Gerais e, além de uma frota veicular de 413.992 veículos, também apresenta um distrito industrial, perfilando como uma cidade atrativa nos diversos meios econômicos. Dessa forma, com o intuito de realizar um estudo preliminar da qualidade do ar, quatro escolas da rede básica de ensino, foram selecionadas. Nestas foram realizadas medidas da concentração de $MP_{2,5}$. A concentração do $MP_{2,5}$ foi obtida através de um monitor de material particulado portátil da marca 3M. Os resultados mostram elevadas concentrações nas escolas, especialmente no período noturno. Os resultados deste estudo preliminar sugerem um alerta as crianças potencialmente expostas a concentrações de $MP_{2,5}$ e eventuais danos as à saúde, levantando a necessidade de estratégias de controle por parte dos órgãos públicos, sendo necessário uma estação de monitoramento da qualidade do ar na cidade de Uberlândia.

ABSTRACT

This study aimed to assess indoor air quality in schools by quantifying particulate matter (PM_{2.5}). In recent years, the adverse health effects of air pollution, particularly particulate matter (PM), have received special attention. Epidemiological studies have identified respiratory diseases related to suspended PM of different aerodynamic diameters, especially PM_{2.5}, which reaches the lower respiratory tract, including the bronchi and alveoli. Pollution from industries, motor vehicles, and fuel combustion has become a serious problem, with potential adverse effects on human health. Research indicates that PM emitted from various sources is associated with increased respiratory symptoms in the population. Since school-aged children spend much of their time in schools, the potential adverse effects of pollutants emitted by potential sources of emissions have been investigated. Uberlândia, the second-largest city in the state of Minas Gerais, has a vehicle fleet of 413,992 and an industrial district, making it an attractive city in various economic sectors. Therefore, to conduct a preliminary study of air quality, four elementary schools were selected. Measurements of PM_{2.5} concentration were taken using a portable 3M particulate matter monitor. The results show high concentrations in schools, especially at night. This study suggests that children are exposed to potentially harmful concentrations of PM_{2.5}, highlighting the need for control strategies by public authorities and the urgent need for further studies and an air quality monitoring station in Uberlândia.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

µg – Micrograma

µm – Micrômetro

µg.m-3 - Micrograma por metro cúbico

CEMEPE - Centro Municipal de Estudos e Projetos Educacionais Julieta Diniz

CO - Monóxido de carbono

CO₂ - Dióxido de carbono

COVs - Compostos orgânicos voláteis

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

HC - Hidrocarbonetos

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MP - Material particulado

MP10 - MP com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 µm

MP2,5 - MP com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 µm

NO₂ - Dióxido de nitrogênio

NO_x - Óxidos de nitrogênio

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

O₃ - Ozônio

OMS - Organização Mundial da Saúde

°C - Graus Celsius

PB5 - Chumbo

PTS – Partículas Totais em Suspensão

PEAC - Programa Escola Água Cidadã

SO₂ - Dióxido de enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	2
2.1	Características atmosféricas.....	2
2.2	Poluentes atmosféricos	6
2.3	Padrões de qualidade do ar	9
2.4	Material particulado.....	11
2.5	Fontes de emissão de MP	13
2.6	Efeitos adversos à saúde	14
2.7	Remoção dos poluentes	16
2.8	O município de Uberlândia.....	16
2.9	Medidas de MP em Uberlândia	17
2.10	Instrumentação - método ótico	19
2.11	Estudos sobre exposição de crianças a poluição do ar em escolas	20
3	OBJETIVOS.....	20
3.1	Objetivo geral	20
3.2	Objetivos específicos	20
4	METODOLOGIA.....	21
4.1	Área de estudo	21
4.2	Seleção dos pontos de coleta	21
4.3	Equipamento utilizado	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5.1	Caracterização meteorológica.....	28
5.2	Concentrações de MP _{2.5} e comparação com variáveis meteorológicas	33
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, tem-se observado um aumento constante na emissão de poluentes atmosféricos nas cidades devido ao desenvolvimento industrial e urbano. Esses poluentes não permanecem inertes após serem liberados, o que pode resultar em uma série de transformações físico-químicas.

Dentre os diversos poluentes presentes na atmosfera, destaca-se o material particulado, uma mistura de partículas sólidas e gotículas de líquidos encontradas no ar. Algumas dessas partículas são grandes (moda grossa), escuras e visíveis, como é o caso da fumaça e da fuligem. Outras são extremamente pequenas (moda fina) e só podem ser observadas através de um microscópio. A emissão de material particulado pode ter origem tanto em fontes naturais quanto antropogênicas. Vulcões, pólenes, poeiras e erupções geotérmicas são exemplos de fontes naturais, enquanto a fumaça do cigarro, os motores de veículos e as caldeiras industriais são considerados fontes antropogênicas (QUEIROZ; JACOMINO; MENEZES, 2007).

A exposição ao material particulado, tanto na forma de moda grossa quanto fina, pode acarretar graves danos à saúde humana. A moda grossa afeta principalmente as vias respiratórias superiores, tendo efeitos significativos no sistema respiratório e cardiovascular. Por outro lado, a exposição ao material particulado mais fino afeta as vias respiratórias inferiores e pode resultar em problemas como diminuição da imunidade, complicações cardíacas, renais e neurológicas, além de potencialmente causar alterações cromossômicas. Esses danos à saúde são resultado da capacidade do material particulado de penetrar profundamente nos pulmões e até mesmo entrar na corrente sanguínea, causando inflamação e estresse oxidativo nas células. (QUEIROZ; JACOMINO; MENEZES, 2007). Portanto, é fundamental adotar medidas para reduzir a exposição a esses poluentes e proteger a saúde pública.

No Brasil, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos pela Resolução CONAMA nº491/2018, porém, as concentrações estabelecidas para o material particulado na atmosfera ainda estão aquém do recomendado pela OMS, evidenciando a necessidade de revisão desses padrões. Esses critérios foram definidos pela OMS com o propósito de preservar a saúde humana, embasados em estudos epidemiológicos que destacam associações entre a exposição a tais partículas e efeitos adversos à saúde, especialmente no contexto de doenças respiratórias e cardiovasculares.

Essa lacuna na regulamentação brasileira gera uma necessidade urgente de atualização e ampliação dos padrões de qualidade do ar. É essencial que o país esteja alinhado com as recomendações internacionais para garantir a proteção da saúde da população e enfrentar os desafios relacionados à poluição atmosférica (MARQUES; SANTOS, 2012).

O presente trabalho propõe, em conjunto com as ações do Programa Escola Água Cidadã em Uberlândia-MG, a realização de medições de $MP_{2,5}$ nas escolas municipais em pontos estratégicos da cidade, visando avaliar as possíveis fontes de emissões desse material particulado nos locais monitorados. Além de avaliar os parâmetros meteorológicos em conjunto com as concentrações de material particulado.

Para atingir os objetivos do presente trabalho, foram definidos critérios específicos, considerando que Uberlândia não dispõe de uma estação de monitoramento da qualidade do ar, embora existam algumas medidas já adotadas, contudo, esses dados não estão disponíveis para a população em geral. Portanto, a coleta de dados de $MP_{2,5}$ se revela uma medida crucial, especialmente em ambientes escolares, contribuindo para uma abordagem mais abrangente em relação à qualidade do ar na cidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Características atmosféricas

A atmosfera é uma camada de ar ao redor da Terra, composta por gases, vapor d'água e partículas. Ela se estende até cerca de 9.600 quilômetros de altitude. Os principais gases presentes na atmosfera são o nitrogênio e o oxigênio, que representam a maior parte dela. Essa mistura de gases é essencial para a vida no planeta. O nitrogênio, que constitui cerca de 78% da atmosfera, é importante para o crescimento das plantas. Já o oxigênio, que corresponde a aproximadamente 21% da atmosfera, é fundamental para a respiração de animais e seres humanos. Além do nitrogênio e oxigênio, a atmosfera contém outros gases, como o Argônio, dióxido de carbono, metano e ozônio, que têm um papel importante na regulação do clima e no equilíbrio do sistema terrestre. Também há partículas na atmosfera, como poeira, poluentes e aerossóis, que ficam suspensos. Essas partículas contribuem para a formação de nuvens, afetam a qualidade do ar e podem ter impactos tanto na saúde humana quanto no clima global (LENZI; FAVERO, 2000).

A atmosfera possui quatro camadas distintas, que são classificadas de acordo com critérios como a composição do ar e variação de temperatura. A classificação mais comumente aceita é baseada na variação da temperatura conforme a altitude aumenta (WALLACE e

HOBBS, 2006). Essas camadas são a troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. Entre essas camadas, há três zonas de transição conhecidas como tropopausa, estratopausa e mesopausa. Essas zonas marcam os limites entre as camadas e apresentam mudanças significativas nas características atmosféricas (LIRA, 2009). Essa divisão em camadas e zonas de transição é fundamental para entender as diferentes propriedades e fenômenos que ocorrem na atmosfera, bem como para estudar a interação entre a Terra e o espaço.

A troposfera é a camada mais próxima da superfície terrestre, localizada na parte inferior da atmosfera, com uma altitude média de aproximadamente 12 quilômetros. É uma camada caracterizada por sua instabilidade devido ao intenso movimento de energia térmica e às significativas variações de temperatura. Nessa camada, a temperatura geralmente diminui à medida que a altitude aumenta, e é onde a maior parte do vapor d'água e poluentes provenientes de gases estufa estão concentrados. Essa camada é de extrema importância, pois é onde ocorrem os fenômenos climáticos e os processos que afetam diretamente a vida na Terra. A interação entre o ar, a água e a superfície terrestre ocorrem principalmente nessa região, influenciando o clima, a formação de nuvens, a distribuição de chuvas e a qualidade do ar (LENZI; FAVERO, 2000).

A estratosfera encontra-se entre a troposfera e a mesosfera, estendendo-se por aproximadamente 50 quilômetros de altitude. É a segunda camada mais próxima da superfície terrestre. Uma característica importante dessa camada é a presença da camada de ozônio. O ozônio é um gás que absorve os raios ultravioleta emitidos pelo Sol, desempenhando um papel crucial na proteção do nosso planeta. Na estratosfera, observa-se uma região inicialmente quase isoterma, ou seja, com temperatura constante, nos primeiros 20 quilômetros. No entanto, à medida que a altitude aumenta, a temperatura do ar começa a aumentar devido à absorção da radiação ultravioleta solar pelo ozônio. Essa absorção de energia ultravioleta pela camada de ozônio é fundamental para evitar que a maior parte da radiação nociva alcance a superfície terrestre. Ela forma uma barreira protetora contra os efeitos danosos do UV, que podem causar problemas de saúde, como danos à pele, e afetar os ecossistemas (BAIRD, 2018).

A próxima camada é a mesosfera, localizada a uma altitude de aproximadamente 80 quilômetros. É uma região caracterizada por temperaturas extremamente frias, chegando a alcançar -95°C . Por isso, é considerada a camada mais fria da atmosfera, com a temperatura diminuindo à medida que a altitude aumenta. Nessa camada, os gases estão mais rarefeitos, o que resulta em uma maior incidência de radiação ultravioleta solar. Essa radiação é responsável por diversos fenômenos atmosféricos, como a ionização dos átomos e a formação de auroras

boreais e austrais. Além disso, na mesosfera, ocorre a presença significativa de átomos de ferro. Esses átomos são provenientes de poeira cósmica e meteoros que se desintegram ao entrar na atmosfera terrestre. Quando essas partículas colidem com a mesosfera, liberam energia luminosa, resultando na observação de meteoros e estrelas cadentes (BAIRD, 2018).

A camada final da atmosfera é a termosfera, que se estende a uma altitude entre 600 e 1000 quilômetros. Os principais componentes presentes nessa camada são o hélio, nitrogênio atômico e oxigênio atômico. Na termosfera, a temperatura aumenta à medida que a altitude aumenta. Esse aumento de temperatura é resultado da absorção de radiação de curto comprimento de onda pelos átomos de oxigênio e nitrogênio presentes na camada. Esses átomos são ionizados quando perdem elétrons devido à interação com essa radiação. Essa região da atmosfera é caracterizada por altas temperaturas, embora essas temperaturas não sejam percebidas da mesma forma que em camadas inferiores, devido à baixa densidade de partículas (LIRA, 2009).

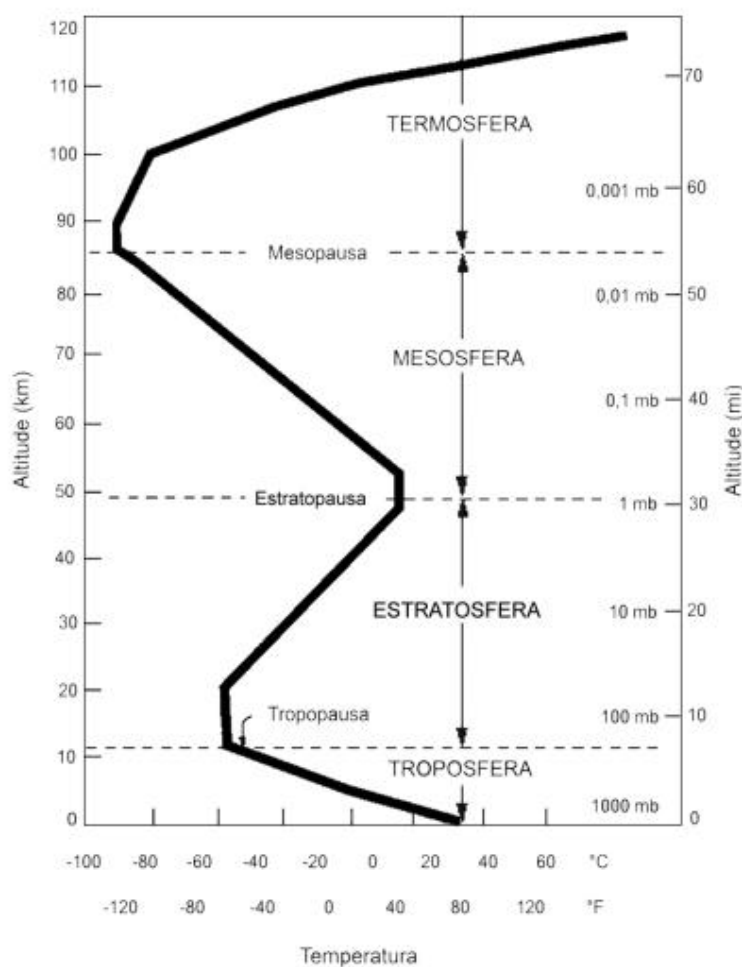


Figura 1: Camadas da atmosfera segundo critérios da composição do ar e variação de temperatura. Fonte: (LIRA, 2009)

Além disso, para uma melhor compreensão dos aspectos distintivos da atmosfera, é fundamental examinar o movimento das massas de ar, o balanço de calor atmosférico, a composição química e as reações que ocorrem nela. Para isso, é essencial ter uma visão geral sobre a composição e as características físicas da atmosfera, como indicado na tabela 1.

Tabela 1 - Composição atmosférica

Elemento	Porcentagem
Nitrogênio	78,08%
Oxigênio	20,95%
Argônio	0,934%
Dióxido de Carbono	0,036%
Neônio	$1,818 \cdot 10^{-3} \%$
Hidrogênio	0,0010%
Criptônio	$1.14 \cdot 10^{-4} \%$
Hélio	$5,24 \cdot 10^{-4} \%$
Metano	0,0002%
Monóxido de Carbono	0,00001%
Xenônio	$8,7 \cdot 10^{-6} \%$
Ozônio	0,000002%
Amônia	0,000001%
Dióxido de Nitrogênio	0,0000001%
Dióxido de Enxofre	0,00000002%

Fonte: (MANAHAN, 2001)

As características físicas e químicas da atmosfera são determinadas por processos de transferência de massa e energia. Essa transferência de energia pode acontecer de três maneiras diferentes: condução, convecção e radiação. A condução ocorre quando as moléculas presentes na atmosfera interagem umas com as outras, mas sem haver um movimento em massa. Esse processo é relativamente lento. A convecção está relacionada ao movimento das massas de ar devido às mudanças rápidas de temperatura. Além de transportar calor sensível, ela também transporta calor latente na forma de vapor de água, que é liberado quando esse vapor se condensa. Por fim, a radiação é o mecanismo pelo qual a energia é transmitida na atmosfera terrestre através de ondas eletromagnéticas. Essas ondas são a única forma de energia que pode

se propagar no vácuo. É através desse mecanismo que a energia é perdida para o espaço, permitindo que o planeta mantenha seu equilíbrio térmico (MANAHAN, 2001).

Estima-se que cerca da metade da energia do sol que chega à Terra atinja diretamente sua superfície. A outra metade pode ser dispersa devido à presença de nuvens, gases ou partículas na atmosfera. Também há uma pequena quantidade de energia que chega à superfície através dos processos de convecção e condução mencionados antes. A parte da energia que não chega à superfície é refletida ou absorvida pela atmosfera. Essa energia é então irradiada de volta para o espaço na forma de radiação infravermelha (MANAHAN, 2001).

2.2 Poluentes atmosféricos

Segundo a Resolução CONAMA 491, um poluente atmosférico compreende toda substância ou manifestação de energia presente na atmosfera, cujos níveis de intensidade, quantidade, concentração ou duração ultrapassam os limites estabelecidos. Essa condição pode acarretar a inadequação, prejuízo ou desconforto à saúde humana, provocando também danos à fauna e flora. Além disso, interfere na segurança e perturba as atividades cotidianas da comunidade.

A poluição do ar pode ser originada de duas categorias principais: (a) fontes de poluição natural e (b) fontes de poluição causadas pelo homem, também chamada de antropogênica ou antrópica. Nas fontes naturais (categoria a), são exemplos os gases liberados pela decomposição de animais e plantas, a evaporação natural e a decomposição de matéria orgânica. Esses processos ocorrem naturalmente na atmosfera e contribuem para a composição química do ar. Por outro lado, as fontes de poluição causadas pelo homem (categoria b) têm um impacto significativo na qualidade do ar. Essas fontes incluem atividades industriais, como fábricas e usinas de energia, que emitem gases e partículas poluentes. Os veículos também são uma importante fonte de poluição do ar, liberando gases e emissões de escape. Além disso, a queima de resíduos ao ar livre, a incineração de resíduos e as emissões de processos químicos também contribuem para a poluição atmosférica (GOMES, 2008).

A interação entre as fontes de poluição desempenha um papel crucial na determinação da qualidade do ar. Para monitorar e avaliar essa qualidade, são realizadas medições que se concentram em determinados poluentes. Essa seleção é baseada em sua frequência de ocorrência e nos efeitos adversos que podem causar à saúde humana e ao meio ambiente. Os principais poluentes atmosféricos considerados indicadores da qualidade do ar são: o dióxido de enxofre (SO₂), um gás liberado principalmente pela queima de combustíveis fósseis

contendo enxofre, como carvão e óleo combustível, e contribui para a formação de chuva ácida e pode irritar o sistema respiratório, especialmente em altas concentrações; monóxido de carbono (CO), um gás inodoro e incolor produzido pela queima incompleta de combustíveis fósseis, como gasolina e diesel, e sua exposição pode levar a sintomas como dores de cabeça, tonturas e, em casos graves, até mesmo levar à morte; o ozônio (O₃), um gás que pode ser formado na atmosfera pela reação entre óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs) na presença de luz solar, sua exposição pode causar irritação nos olhos, no nariz e na garganta, bem como problemas respiratórios; os hidrocarbonetos (HC), são compostos orgânicos voláteis liberados por diversas fontes, como solventes, combustíveis, produtos químicos industriais e emissões veiculares que contribuem para a formação de ozônio troposférico e têm efeitos adversos na saúde, incluindo irritação das vias respiratórias; os óxidos de nitrogênio (NO_x), são compostos químicos formados pela combinação de oxigênio e nitrogênio durante processos de combustão, como queima de combustíveis fósseis e emissões de veículos; e o material particulado (MP), que será abordado nos índices a seguir (LIMA, 2007; LIRA, 2009).

Dentro das fontes de poluição do ar antropogênicas, há um destaque para as fontes industriais (fontes estacionárias) e veículos (fontes móveis). Atualmente, os veículos desempenham um papel significativo na poluição do ar, sendo considerados a principal fonte de emissões. Eles são divididos em duas categorias principais: veículos leves movidos a gasolina ou álcool e veículos pesados movidos a diesel. Esses veículos emitem uma variedade de substâncias poluentes, como CO₂, NO_x, compostos orgânicos voláteis (COVs) e material particulado, que contribuem para a degradação da qualidade do ar. A poluição atmosférica ocorre devido à liberação de produtos químicos no ar ou por meio de reações químicas que promove a formação de outras espécies químicas alterando assim a composição atmosférica. Essas substâncias podem impactar de diferentes formas a qualidade do ar, dependendo de fatores como sua concentração, composição química, condições ambientais e momento em que as emissões ocorrem (GOMES, 2008).

Nos veículos, ocorre a emissão de gases, partículas e vapores provenientes do escapamento, sistema de alimentação de combustível e respiro do cárter do motor. Além disso, o desgaste dos pneus e freios também contribui para a poluição do ar. A quantidade de poluentes emitidos varia de acordo com diversos fatores, como as características da frota (composição, ano/modelo), tipo e composição do combustível, tecnologia de alimentação, condições do

tráfego local, densidade do fluxo de veículos, modo de operação, velocidade, manutenção adequada e traçado das vias (LIRA, 2009).

Adicionalmente, durante o abastecimento, os veículos também emitem vapores de combustíveis. Isso ocorre devido à liberação dos vapores formados no tanque de combustível para a atmosfera. É essencial considerar essas emissões para compreender o impacto ambiental do uso de veículos (LIRA, 2009).

Ainda dentre as fontes antropogênicas de poluição atmosférica encontram-se uma variedade de processos e operações industriais, incluindo a queima de combustíveis, o aquecimento industrial, o cozimento de alimentos, a queima de resíduos a céu aberto, a incineração de lixo, a limpeza a seco de roupas, a geração de poeira proveniente de demolições e movimentações de terra na construção civil, o armazenamento e comercialização de produtos voláteis como gasolina e solventes, o uso de equipamentos de refrigeração e ar condicionado, embalagens do tipo "aerossol", atividades de pintura, estações de tratamento de esgoto doméstico e industrial, e a operação de aterros sanitários (BOUBEL, 1994).

Embora os processos industriais possam exercer um impacto ambiental localizado significativo, é geralmente mais factível e eficaz prevenir ou controlar as emissões provenientes dessas fontes em comparação com outras fontes, como as relacionadas aos veículos automotores. Cada fonte industrial de poluição atmosférica possui características específicas, com a quantidade e o tipo de poluentes emitidos dependendo de diversos fatores, como os tipos de matérias-primas e combustíveis utilizados no processo, os produtos fabricados, as operações do processo industrial, sua eficiência e as medidas de controle implementadas (DERISIO, 1992).

As queimadas têm sido alvo de crescente preocupação e debate, dada sua abrangência e os diversos ecossistemas e práticas agrícolas que afetam, acarretando impactos ambientais significativos tanto em níveis locais quanto regionais. Desde 1991, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), vem conduzindo um monitoramento detalhado e sistemático das queimadas, empregando técnicas de sensoriamento remoto, cartografia digital e comunicação eletrônica. Para este fim, os satélites da série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 12 e 14 têm sido utilizados pela EMBRAPA. Os estudos realizados possibilitam uma compreensão mais profunda da problemática das queimadas. Análises via satélite indicam que os meses de agosto a outubro são os mais críticos em termos de ocorrência de queimadas, registrando-se em alguns anos mais de 70.000 focos. Geralmente, as queimadas têm origem na atividade agrícola e tendem a ocorrer em áreas previamente

desmatadas, apresentando padrões espaciais distintos e uma dinâmica temporal variável. São consideradas particularmente preocupantes aquelas queimadas que atingem uma magnitude significativa e que, em geral, permanecem ativas no início da noite, bem como aquelas que exibem uma intensidade e frequência temporais específicas em cada localidade (EMBRAPA, 2006).

A fim de facilitar a classificação dos poluentes, eles são divididos em duas categorias principais: poluentes primários e poluentes secundários. Os poluentes primários são aqueles emitidos diretamente pelas fontes emissoras. Já os poluentes secundários são formados a partir de reações químicas entre poluentes primários e componentes naturais presentes na atmosfera. Os poluentes primários incluem substâncias como dióxido de enxofre (SO₂), óxido de nitrogênio (NO), material particulado (MP, principalmente na forma de fuligem), hidrocarbonetos e compostos orgânicos voláteis (COVs). Esses poluentes são liberados diretamente na atmosfera por meio de processos de combustão, evaporação e atividades industriais. Por outro lado, os poluentes secundários são formados quando os poluentes primários reagem quimicamente com componentes naturais da atmosfera, são exemplos de poluentes secundários o ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂) e o material particulado. Essas reações ocorrem devido à presença de luz solar e condições adequadas de temperatura e umidade. Os poluentes secundários representam um desafio adicional na redução da poluição do ar, pois sua formação depende de múltiplos fatores e não são emitidos diretamente pelas fontes emissoras. Além disso, também é importante destacar que tanto os poluentes primários quanto os secundários têm impactos negativos na qualidade do ar e na saúde humana. A exposição a esses poluentes pode aumentar o risco de doenças graves (LIMA, 2007).

2.3 Padrões de qualidade do ar

Os padrões de qualidade do ar desempenham um papel fundamental no sistema legislativo, estabelecendo limites máximos para a concentração de poluentes na atmosfera, com o objetivo de garantir a proteção da saúde e o bem-estar das pessoas. Esses padrões têm como finalidade estabelecer níveis aceitáveis de concentração de poluentes que não representem riscos significativos para a saúde humana. Eles são baseados em extensas pesquisas científicas, considerando os efeitos adversos que determinados poluentes podem causar ao serem inalados ou em contato com o organismo humano. Ao definir esses limites, busca-se reduzir os efeitos nocivos da poluição do ar, minimizando o risco de doenças respiratórias, cardiovasculares e outros problemas de saúde associados à exposição prolongada a poluentes atmosféricos, sendo

assim, os padrões de qualidade do ar desempenham um papel crucial na proteção da saúde pública, fornecendo diretrizes regulatórias que auxiliam na mitigação dos impactos da poluição atmosférica e na promoção de um ambiente mais saudável para todos (QUEIROZ; JACOMINO; MENEZES, 2007).

Na Tabela 2, estão apresentadas as classes de poluentes atmosféricos trazidas no CONAMA 491/2018 e seus padrões de qualidade do ar, recentemente atualizado pelo conselho no dia 12/06/2024, tornando os padrões mais restritivos (BRASIL, 2018). A cidade de Uberlândia se encontra atualmente no PI-1.

Tabela 2 - Padrões de qualidade do ar

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PI-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PI-3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PI-4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PF $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm
Material Particulado – MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual ¹	40	35	30	20	15	-
Material Particulado – MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	15	-
	Anual ¹	20	17	15	10	5	-
Dióxido de enxofre – SO ₂	24 horas	125	50	30	40	40	-
	Anual ¹	40	30	20	20	20	-
Dióxido de nitrogênio – NO ₂	1 hora ²	260	240	220	200	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	10	-
Ozônio – O ₃	8 horas ³	140	130	120	100	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual ¹	40	35	30	20	15	-
Monóxido de Carbono – CO	8 horas ³	-	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão – PTS	24 horas	-	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	-	80	-
Chumbo – Pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	-	0,5	-

¹ - Média aritmética anual² - Média horária³ - Máxima média móvel obtida no dia⁴ - Média geométrica anual⁵ - Medido nas partículas totais em suspensão*Fonte: (BRASIL, 2018)*

2.4 Material particulado

O termo "material particulado" é amplamente utilizado para descrever partículas sólidas e/ou líquidas suspensas no ar. Quanto à sua origem, essas partículas podem ter fontes naturais,

como a ressuspensão do solo, ou serem de origem antropogênica, sendo os automóveis, a indústria e a agricultura as fontes mais comuns.

Os componentes predominantes do material particulado presente na atmosfera em suspensão incluem sulfato, nitrato, íons de hidrogênio, amônia, gotículas de água, carbono elementar, compostos orgânicos, sal marinho, metais, entre outros. A concentração de cada uma dessas substâncias varia de acordo com a região ou local onde o material particulado se formou (HOINASKI, 2010).

As partículas em suspensão podem ser classificadas como primárias ou secundárias. O material particulado é considerado primário quando é encontrado na atmosfera na mesma forma em que foi emitido, enquanto é classificado como secundário quando é formado por reações químicas no ar ambiente. Entre as partículas primárias estão a fumaça proveniente de veículos automotores contendo carbono elementar, uma ampla variedade de compostos orgânicos condensados gerados durante processos de combustão, bem como compostos metálicos como Arsênio, Selênio, Zinco, entre outros, que são condensados após a combustão (HOINASKI, 2010).

A formação de partículas secundárias é influenciada pelas condições atmosféricas, como umidade relativa, radiação e temperatura, bem como pela reatividade dos gases presentes, entre outros fatores. Muitas partículas são geradas por meio da condensação de vapores resultantes de reações entre gases precursores. Além disso, a formação secundária pode ocorrer pela adição de novas partículas ao material particulado já existente. Grande parte do nitrato, sulfato e alguns compostos orgânicos presentes no material particulado é formada de maneira secundária. (SEINFELD; PANDIS, 1998).

O tamanho é um dos principais parâmetros para caracterizar o comportamento das partículas. Por isso, é estabelecido o parâmetro de "poeira total em suspensão", que abrange partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 100 μm . O diâmetro aerodinâmico de uma partícula corresponde ao diâmetro de uma esfera de densidade única que apresenta a mesma velocidade de sedimentação da partícula em análise (SEINFELD; PANDIS, 1998).

A distribuição dos tamanhos das partículas varia de 0,02 a 1000 μm , com pelo menos três faixas distintas, o que torna a amostragem uma tarefa complexa. Essa faixa de tamanho varia conforme a fonte, a composição química e o tempo de residência na atmosfera. É importante ressaltar que a presença de partículas no ar pode afetar o meio ambiente e a saúde humana de várias maneiras, tornando fundamental a seleção de um método de amostragem adequado aos objetivos de cada estudo.

De forma resumida, as partículas atmosféricas são categorizadas em $MP_{2,5}$ e MP_{10} . A primeira, também conhecida como partículas respiráveis, refere-se àquelas com diâmetro aerodinâmico menor que $2,5\ \mu m$. O segundo grupo, denominado partículas inaláveis, engloba as partículas com tamanho inferior a $10\ \mu m$. As partículas de diferentes dimensões exibem comportamentos distintos na atmosfera, já que as partículas maiores (MP_{10}) tendem a se depositar mais rapidamente do que as partículas menores ($MP_{2,5}$). As partículas finas, por sua vez, podem ser transportadas por longas distâncias na corrente gasosa, permanecendo em suspensão e apresentando riscos para a saúde humana (McKENNA, 2008).

Uma vez determinado o método utilizado no estudo, os efeitos a serem analisados e o tipo de equipamento mais adequado para capturar a faixa de tamanhos desejada, é possível observar que as partículas com diâmetro inferior a $10\ \mu m$ são as mais prejudiciais à saúde humana, pois podem ser inaladas, enquanto partículas maiores que $10\ \mu m$ causam menos danos ao corpo humano. No entanto, essas partículas maiores podem danificar a vegetação devido ao seu tempo de permanência reduzido na atmosfera (McKENNA, 2008).

2.5 Fontes de emissão de MP

As fontes de material particulado são geralmente classificadas em duas categorias principais: as fontes naturais e as antropogênicas. Dentre as principais fontes de emissão de material particulado natural, pode-se mencionar o solo, sprays marinhos e partículas vegetais, como pólen e esporos emitidos pelas plantas. Vallero (2008) sugere que é impossível determinar a concentração de fundo das fontes naturais, uma vez que, quando o homem começou a investigar os níveis de poluição por material particulado, o ar já estava contaminado com partículas provenientes das atividades humanas.

Entre as fontes antropogênicas, sobretudo nos grandes centros urbanos, as atividades industriais e o uso de combustíveis fósseis, principalmente pelos veículos automotores, se destacam. A poeira proveniente de veículos automotores ou ressuspensão do solo pelo vento representa uma fonte significativa de material particulado em áreas urbanas. Especificamente nos centros urbanos, os veículos movidos a diesel são os principais contribuintes para as emissões de material particulado devido ao alto consumo de combustível. Além disso, a indústria contribui para o aumento da quantidade de poeira suspensa no ar por meio da queima de combustíveis, além de liberar outros componentes tóxicos na atmosfera (FERNANDES, 2013).

Nos últimos anos, houve um aumento significativo na demanda por biomassa no Brasil, embora a utilização de combustíveis alternativos na queima de biomassa possa resultar em redução das emissões atmosféricas, também temos testemunhado um aumento nas fontes de poluição intensa provenientes da combustão desses materiais. É importante ressaltar que, mesmo mantendo as mesmas emissões atmosféricas, a qualidade do ar pode variar principalmente devido às condições meteorológicas que afetam a dispersão dos poluentes. É por isso que a qualidade do ar geralmente piora nos meses de inverno, quando as condições atmosféricas são menos favoráveis à dissipação dos poluentes. A interação entre as fontes de poluição e a atmosfera é determinante para o nível de qualidade do ar, o qual, por sua vez, influencia o surgimento de efeitos adversos causados pela poluição atmosférica nos seres vivos (FERNANDES, 2013).

2.6 Efeitos adversos à saúde

No âmbito de uma revisão sistemática da literatura, foi constatado que as faixas etárias mais recorrentemente analisadas e confirmadas como as mais vulneráveis aos efeitos da poluição do ar são precisamente os extremos da pirâmide populacional, ou seja, aqueles com menos de 5 anos e os com mais de 65 anos. Estes efeitos têm sido objeto de estudo devido aos potenciais riscos à saúde humana, particularmente em relação ao sistema respiratório (OLIVEIRA; FONTES; RODRIGUES, 2017).

Dada a complexidade da avaliação dos efeitos da poluição do ar na saúde, estudos demonstram a influência das condições climáticas no surgimento de doenças respiratórias, assim como sua sazonalidade. Eles também fazem referência a outras ocorrências, como questões sociais, demográficas, biológicas e precarização das condições de vida e do ambiente urbano. A convivência com a poluição do ar tem acarretado sérias consequências para a saúde, os efeitos dessa exposição têm sido diversos e significativos em termos de alcance. Estes efeitos podem incluir desde doenças agudas ou morte até doenças crônicas, encurtamento da vida ou danos ao crescimento, afetando importantes funções fisiológicas, como ventilação pulmonar, transporte de oxigênio pela hemoglobina e outras funções do sistema nervoso. Além disso, podem ocorrer sintomas adversos, como irritações sensoriais, que, na ausência de uma causa óbvia, como a poluição do ar, podem levar uma pessoa a procurar atendimento médico, bem como desconforto, odor, prejuízo de visibilidade ou outros efeitos da poluição do ar suficientes para levar indivíduos a mudar de residência ou local de trabalho. A poluição do ar está associada a doenças respiratórias (como asma, bronquite e enfisema pulmonar) e desconforto físico

(irritação dos olhos, nariz e garganta, dor de cabeça, sensação de cansaço, tosse), além de agravar doenças cardiovasculares e respiratórias e contribuir para o desenvolvimento de câncer de pulmão (DERISIO, 1992).

Nas últimas duas décadas, vários estudos têm sido conduzidos para quantificar a fração de partículas suspensas no ar que realmente penetram no sistema respiratório, procurando estabelecer uma correlação direta entre os instrumentos de amostragem e o que ocorre durante a inalação humana. Concluiu-se que partículas maiores que 100 μm têm uma baixa probabilidade de penetração no sistema respiratório (LIDÉN, 1994; VICENT, 1990; SANTOS, 2001).

As partículas grandes são capturadas na região nasal devido à impactação nos pelos do nariz e nos desvios das passagens nasais. Já as partículas pequenas passam pela região nasal e se depositam na traqueia bronquial e nas áreas pulmonares. Aquelas com tamanho superior a 10 μm são predominantemente absorvidas pela cavidade nasal e pela garganta, enquanto 90% das partículas maiores que 5 μm precipitam nas partes superiores das vias respiratórias. Partículas com tamanho entre 1 e 5 μm se depositam na traqueia e nos brônquios, enquanto as partículas finas menores que 1 μm alcançam os brônquios e os alvéolos (KIKUO, 1977; HINDS, 1982).

A razão pela qual as partículas pequenas são mais danosas do que as grandes residem no seguinte: as partículas grossas se sedimentam rapidamente, reduzindo a exposição humana por inalação; quando inaladas, as partículas grossas são eficientemente filtradas pelo nariz e pela garganta e geralmente não chegam aos pulmões. Por outro lado, as partículas finas inaladas frequentemente alcançam os pulmões e, uma vez lá, podem ser absorvidas nas superfícies celulares, causando danos à saúde. Além disso, a área superficial por unidade de massa das partículas grandes é menor do que a das partículas pequenas, o que significa que, quando comparadas em massa igual, as partículas maiores têm menor capacidade de transportar moléculas de gás adsorvidas até os órgãos do sistema respiratório, onde podem catalisar reações químicas e biológicas. Isso resulta em um impacto mais disseminado em vários alvéolos (BAIRD, 2018).

Conforme (OLIVEIRA; FONTES; RODRIGUES, 2017), um estudo sobre a incidência de problemas respiratórios foi conduzido utilizando dados da Secretaria de Saúde Municipal de Uberlândia, extraídos dos boletins epidemiológicos da Vigilância Ambiental. A UAI ROOSEVELT foi escolhida como unidade de saúde de referência para a notificação desses

problemas. Essa unidade também presta assistência a crianças de todas as áreas do município, incluindo áreas rurais e distritos.

Os dados deste estudo foram coletados trimestralmente, abrangendo os períodos de janeiro a abril, maio a agosto e setembro a dezembro. A escolha das doenças estudadas, que foram asma e bronquite, foi baseada em sua alta incidência nos boletins epidemiológicos ao longo dos meses. A asma é uma condição inflamatória crônica das vias respiratórias inferiores, afetada por fatores genéticos e ambientais, com hiper responsividade e limitação variável ao fluxo de ar. Por outro lado, a bronquite é a inflamação das principais vias respiratórias, podendo ser aguda ou crônica, desencadeada por infecções virais respiratórias ou exposição a poluentes ambientais e químicos (VARELLA, 2013).

Na presente unidade de referência do estudo em Uberlândia, foram registrados 1469 casos de asma e bronquite em 2015. A análise dos dados tratados revelou uma correlação entre o clima e a demanda por atendimento médico para problemas respiratórios em crianças menores de cinco anos.

2.7 Remoção dos poluentes

A remoção de poluentes ocorre principalmente por meio de processos como a deposição seca, a deposição úmida e as reações químicas. Na deposição seca, as partículas se depositam por sedimentação ou impactação, e os gases são absorvidos ou adsorvidos em superfícies como solo, vegetação e corpos d'água.

A deposição úmida é o principal mecanismo de remoção de poluentes na atmosfera. Envolve dois processos: primeiro, as partículas pequenas atuam como núcleos de condensação, formando gotículas de água que caem como chuva; segundo, as partículas e gases são transportados pela água da chuva.

As reações químicas também desempenham um papel significativo na alteração da concentração de poluentes, resultando na formação de compostos e radicais livres adicionais. Um exemplo disso é a reação fotoquímica dos óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos sob a influência da radiação solar, produzindo oxidantes fotoquímicos, como o ozônio.

2.8 O município de Uberlândia

O estudo de caso foi conduzido em Uberlândia (MG), a segunda maior cidade do estado de Minas Gerais, situada na região do Triângulo Mineiro, a cerca de 543,5 km de Belo Horizonte. Com uma área de 4.115,206 km², a cidade abriga uma população total de 713.232

habitantes, resultando em uma densidade demográfica de 173,32 hab/km², conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022).

A região do Triângulo Mineiro está inserida no sistema climático do Centro-Oeste brasileiro, com diversas massas de ar influenciando seu clima, incluindo Tropical Continental, Equatorial Continental, Tropical Atlântica e Polar Atlântica. É importante ressaltar que a localização geográfica e topografia desempenham um papel crucial na distribuição dessas massas de ar. O clima da região se divide em duas estações distintas, uma caracterizada por um período seco e outra por um período úmido. A temperatura média anual na região é de 23,7°C, com uma média anual de precipitação de 1.489 mm (CARVALHO et al., 2017).

Uberlândia tem se destacado em diversos setores, como turismo, agricultura, geração de empregos, inclusão social e renda. Além disso, a cidade se tornou um importante centro educacional e de conhecimento, abrigando uma universidade federal e mais 20 instituições de ensino superior, o que tem contribuído para atrair eventos técnicos-científicos para a cidade e a região.

2.9 Medidas de MP em Uberlândia

LIMA (2007) realizou uma análise dos dados de qualidade do ar na cidade de Uberlândia, utilizando o Amostrador de Pequenos Volumes (APV-MP2,5) para o monitoramento. No decorrer do estudo, as concentrações resultantes durante os períodos de 02/07/2006 a 12/07/2007 das amostragens de MP_{2,5} estão apresentadas na Figura 2, demonstrando o perfil das concentrações de MP_{2,5} ao longo do período.

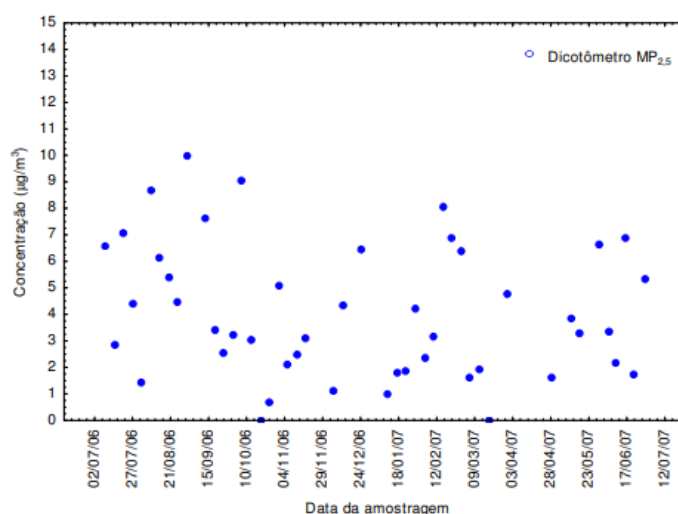


Figura 2 - Resultado de concentração de MP_{2,5} – 07/2006 - 06/2007 no estudo conduzido por LIMA. Fonte: LIMA (2007).

Observa-se que os valores de concentração de MP_{2,5} medidos por LIMA (2007) oscilam de concentrações baixas ($<1 \mu\text{g m}^{-3}$) até valores médios de $10 \mu\text{g m}^{-3}$. Ainda no âmbito da pesquisa, também foi realizada uma análise estatística descritiva sobre a concentração de MP_{2,5} para o tratamento dos dados, no intuito de identificar tendências, dispersões, valores extremos e distribuições dos dados. Os resultados desta análise estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Estatística descritiva para MP_{2,5} com dados de julho/06 a junho/07 no estudo conduzido por LIMA

Média aritmética ($\mu\text{g/m}^3$)	8,2
Erro padrão (-)	2,0
Mediana ($\mu\text{g/m}^3$)	3,4
Desvio padrão ($\mu\text{g/m}^3$)	14,3
Coefficiente de variação	174,4
Curtose	11,9
Assimetria	3,42
Mínimo ($\mu\text{g/m}^3$)	0
Máximo ($\mu\text{g/m}^3$)	75,6
Número de pontos (-)	51

Fonte: LIMA (2007)

Além disso, também conduziu a análise das médias de concentração por estação do ano com intervalos de confiança de 95% (IC 95%), exposta na Tabela 4.

Tabela 4 - Médias de concentração por estação do ano MP_{2,5} no estudo conduzido por LIMA

Estação	Média	IC 95%	Desvio Padrão
Inverno	7,3	$7,3 \pm 4,4$	7,3
Primavera	9,3	$9,3 \pm 13,3$	21,0
Verão	3,7	$3,7 \pm 1,3$	2,3
Outono	6,2	$6,2 \pm 5,2$	7,7

Fonte: LIMA (2007)

Como previsto, as estações que registraram os maiores índices de concentração MP foi a primavera seguida do inverno. Durante esse período, as condições atmosféricas não favorecem a dispersão ou a deposição dos poluentes, resultando em concentrações mais elevadas de MP_{2,5}. A estabilidade atmosférica característica do inverno, com poucos movimentos verticais consideráveis, contribui para a permanência das partículas em suspensão. Além disso, a ausência de chuvas e as temperaturas mais baixas criam um cenário crítico em

termos de poluição, pois as partículas ficam retidas na atmosfera, aumentando o risco de inalação pela população (BOÇON, 1998; NICODEMOS, et al., 2009).

SOARES, OLIVEIRA, RODRIGUES (2015) em outro estudo compararam a concentração com a temperatura, umidade e precipitação, mostrando que em dias de temperatura elevada, há uma redução na umidade atmosférica, aumentando as chances de ocorrência de inversão térmica. Esse fenômeno se caracteriza por uma camada de ar quente que se forma sobre a cidade, aprisionando os poluentes e impedindo sua dispersão.

Além disso, durante períodos de baixa umidade, predominantemente nos meses de junho a outubro, observou-se um aumento na concentração de poluentes, o que pode agravar as doenças respiratórias. O estudo também constatou que o período entre junho e setembro do ano de 2013 foi marcado pela menor precipitação. Como as condições climáticas eram mais desfavoráveis à remoção de poluentes, esse mesmo intervalo foi quando obtiveram as concentrações mais altas.

2.10 Instrumentação - método ótico

Este método se baseia na tecnologia convencional de "dispersão de luz" para estimar concentrações em massa de várias faixas de material particulado e apresenta diversas vantagens, incluindo rapidez, capacidade de analisar grandes volumes de material particulado, realização "in situ" (no local), acesso fácil e controle preciso sobre as características do material particulado, como tamanho, forma e índice de refração (MARQUES, 2013).

A medição é realizada por meio da dispersão da luz, com algoritmos matemáticos que descrevem a extinção da luz (devido à dispersão e absorção) pelos raios de luz que passam pela amostra diluída contendo partículas. A dispersão de luz é um método eficaz para determinar as características físicas do material particulado, incluindo tamanho, forma e índice de refração. A distribuição de tamanhos do material particulado é obtida a partir do espalhamento da luz em ângulos específicos, sendo que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho das partículas (MARQUES, 2013).

Em síntese, o "Método Ótico" se baseia na interação da luz com a matéria particulada para estimar sua concentração e características físicas, sendo uma abordagem amplamente utilizada em várias áreas, como controle de poluição do ar e monitoramento ambiental (MARQUES, 2013).

2.11 Estudos sobre exposição de crianças a poluição do ar em escolas

As crianças, adolescentes e idosos são os grupos mais suscetíveis aos efeitos adversos da poluição do ar na saúde em uma sociedade (JACOBSON et al., 2014). Portanto, é fundamental assegurar uma boa qualidade do ar interno nas escolas, pois este é o ambiente interno onde crianças e adolescentes passam a maior parte do tempo diariamente (AMATO et al., 2014).

Um estudo conduzido por (FERNANDES, 2017) teve como objetivo caracterizar o ambiente interno e externo de uma escola de ensino infantil e médio no município de Iranduba (AM), em termos de concentração de material particulado ($MP_{2,5}$). A pesquisa foi realizada durante as estações chuvosa e seca, com ventos de baixa velocidade. A maior concentração de $MP_{2,5}$ foi observada no período seco, dentro da sala de aula, onde a concentração interna de $MP_{2,5}$ foi, pelo menos, duas vezes maior do que a externa na mesma estação.

Outro estudo, conduzido por (EIDT, 2013), teve como objetivo descrever os níveis de poluição atmosférica em escolas públicas de Porto Alegre e avaliar o desempenho de diferentes metodologias de medição da concentração de poluentes. Foram medidos os níveis de poluentes aos quais os alunos das escolas públicas de Porto Alegre estão expostos. Além disso, foram avaliados os níveis de $MP_{2,5}$ nos microambientes das escolas por meio de medições em movimento e pontuais. O estudo indicou que um número significativo de escolas e alunos em Porto Alegre estão localizados em áreas com níveis de poluição atmosférica considerados arriscados para a saúde, de acordo com a OMS. Também foi observado que a concordância entre os métodos de avaliação da poluição utilizados foi inferior ao esperado.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo geral avaliar as concentrações de Material Particulado ($MP_{2,5}$) em escolas abrangendo desde o Ensino Infantil até o Ensino Médio na cidade de Uberlândia - MG.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a região de estudo sobre os fatores que interferem na emissão de MP
- Caracterização meteorológica da área de estudo;

- Conduzir medições de material particulado ($MP_{2,5}$) durante as atividades de educação ambiental promovidas pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) nas escolas da rede pública de Uberlândia.
- Relacionar os dados obtidos com as fontes potenciais de poluição do ar locais, como indústrias, veículos automotores e queimadas, a fim de identificar os principais fatores contribuintes para a poluição atmosférica.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A escolha da área de estudo, mais especificamente das escolas em que foram realizadas as medições das concentrações de $MP_{2,5}$, se deu pela autorização do Centro Municipal de Estudos e Projetos Educacionais Julieta Diniz (CEMEPE) na realização da coleta dos dados nos respectivos locais. Foram realizadas cinco amostragens, em cinco períodos diferentes, nos dias 08/09/2022, 12/09/2022, 13/09/2022, 19/09/2022 e 27/09/2022 em quatro escolas públicas diferentes em cada momento.

Para garantir a preservação do anonimato das escolas envolvidas neste estudo, optamos por não divulgar os nomes das instituições de ensino. Em vez disso, concentraremos nossa atenção nas características e resultados das escolas, fornecendo informações relevantes sobre o bairro em que estão localizadas. Essa abordagem visa proteger a privacidade das escolas enquanto ainda permite uma análise completa e informativa do contexto em que operam. Dessa forma, poderemos explorar os dados com a devida consideração pelo anonimato das escolas. As escolas estão compreendidas nos bairros Jardim das Palmeiras, Santa Luzia, Jardim Brasília e Mansour, bairros compreendidos dentro do município de Uberlândia (MG). A metodologia utilizada neste trabalho pode ser dividida em: coleta dos dados da concentração de $MP_{2,5}$, temperatura, umidade e análise dos dados coletados comparando com as definições da legislação vigente.

4.2 Seleção dos pontos de coleta

Foram selecionadas quatro escolas públicas na cidade de Uberlândia. Os critérios para a seleção das escolas foram: permissão da diretora da escola, condições adequadas para manuseio do equipamento e as escolas deveriam estar em regiões distantes uma da outra sendo que uma das escolas deveria estar próxima do distrito industrial da cidade.



Figura 3 – Mapa geral das escolas. Fonte: Google Earth

O primeiro local de coleta, denominado de ponto M1, é localizado em uma região onde existe um intenso fluxo de trânsito devido à proximidade da Avenida Getúlio Vargas, umas das principais vias de Uberlândia, contemplando muitos comércios, supermercados, hospitais, drogarias e restaurantes, além de ser uma via bem arborizada. A escola eleita para este trabalho é responsável pelo Ensino Fundamental de anos iniciais, isto é do 1º ao 5º ano. Esta escola encontra-se bem arborizada, com árvores de médio porte, o que contribui para dificultar a dispersão dos aerossóis. A Figura 4 ilustra a localização da região da escola e é possível visualizar a boa arborização da escola e da avenida próxima nesta região.



Figura 4 – Foto do ponto M1. Fonte: Google Earth.

O segundo local de coleta, denominado ponto M2, localiza-se em outra região da cidade de Uberlândia, esta escola encontra-se em um fundo de vale, o que contribui para dificultar a dispersão dos aerossóis, e próxima ao Parque Municipal Santa Luzia, que compreende uma área de aproximadamente 26 hectares de vereda. Está a uma distância aproximada de 11 km da outra escola localizada em M1. Neste ponto do trabalho, a escola em questão é responsável pelo Ensino Infantil, isto é, se divide em: creche (0 a 03 anos) e pré-escola (04 a 06 anos). A Figura 5 mostra a localização da região onde a escola está situada em uma visão mais distante, permitindo observar a grande cobertura de área verde do parque ao redor, com ruas pavimentadas e algumas não pavimentadas. Nesta região, há um intenso tráfego de linhas de ônibus de transporte público, devido ao Terminal Santa Luzia estar localizado há 1,2 km de distância do ponto de M2.



Figura 5 – Foto do ponto M2. Fonte: Google Earth.

O terceiro local de coleta, denominado de M3, está localizado em uma região onde existem várias indústrias próximas, perto do Distrito Industrial da cidade. A escola eleita para este trabalho é responsável pelo Ensino Infantil, Ensino Fundamental I e Ensino Fundamental II. A Figura 6 ilustra o ponto da escola e a região circunvizinha. Numa visão mais distante pode-se visualizar algumas indústrias locais ao redor da área da escola. Neste ponto da amostragem, foram realizadas duas medições em dois dias diferentes e em horários diferentes.



Figura 6 – Foto do ponto M3. Fonte: Google Earth.

O quarto local de coleta, denominado ponto M4, está localizado em uma região distinta da cidade, sendo próxima de áreas ainda em processo de urbanização. Esta área é marcada pela presença de várias chácaras e fazendas em seu entorno, com uma presença de extensas áreas verdes. A proximidade com estas áreas e a topografia peculiar do local podem influenciar significativamente na dispersão dos aerossóis, tornando este local uma escolha estratégica para o estudo. A escola selecionada neste ponto atende alunos do Ensino Infantil, incluindo creche (0 a 3 anos) e pré-escola (4 a 6 anos), ressaltando a importância de compreender os potenciais riscos à saúde das crianças mais jovens. A Figura 7 ilustra a região circunvizinha e o ponto onde está situada a escola.



Figura 7 – Foto do ponto M4. Fonte: Google Earth.

A coleta de dados no ponto M1 foi realizada em 8 de setembro de 2022, seguida pelo ponto M2 em 12 de setembro. No ponto M3, as amostras foram coletadas em dois dias distintos, 13 e 19 de setembro, enquanto no ponto M4 a coleta ocorreu em 27 de setembro. Durante todo o período de amostragem no mês de setembro, as condições meteorológicas mantiveram-se estáveis, com temperatura variando entre 29,1 e 33,5°C, conforme registrado nos locais de coleta, o que possibilitou sem maiores dificuldade a locomoção até os pontos de amostragem e o manuseio do equipamento.

Uma visão geral das atividades dos alunos nessas escolas e do tempo dedicado a cada atividade pode ser contabilizada. Em média, as crianças passam cerca de 4 horas por dia na escola, sendo 3,5 horas dentro da sala de aula e 30 minutos no pátio (com 10 minutos entre a entrada e a saída e 20 minutos de recreio). Além disso, as crianças do Ensino Fundamental I e Fundamental II têm uma aula de educação física por semana, com duração de 50 minutos, realizada na quadra da escola. Considerando uma média semanal, cada criança passa aproximadamente 20 horas na escola, sendo 17,5 horas em sala de aula e 2,5 horas no pátio. Portanto, durante o período letivo, cada criança dedica cerca de 11% do seu dia à escola, sendo 10% dentro da sala de aula e 1% no pátio escolar. Esses dados proporcionam uma compreensão mais clara do tempo e das atividades dos alunos no ambiente escolar.

4.3 Equipamento utilizado

O equipamento utilizado para fazer as medições de concentração de $MP_{2,5}$ no ar atmosférico é apresentado na Figura 8.



Figura 8 – Multiparâmetro Série 3M EVM-7. Fonte: Catálogo 3M

Trata-se de um monitor de qualidade do ar portátil da marca 3M. A série 3M EVM-7 mede a concentração de partículas e qualidade do ar em um só instrumento compacto. Possui visor amplo, botões e telas simples, comandos diretos e soluções através de software robusto, durável e fácil de usar, fornecendo monitoramento simultâneo. A série EVM-7 é específico para leitura direta das concentrações de partículas em tempo real. Este instrumento tri-sensor utiliza a bomba de amostragem embutida e o disco de seleção de partículas para as leituras de concentração de massa em tempo real.

A base frontal do monitor é uma plataforma eletrônica com um visor e botões para operação. O sensor acoplado ao topo é a parte do equipamento que faz a sucção do ar e leitura da concentração do $MP_{2,5}$. O equipamento apresenta as características listadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Principais características do medidor de MP_{2,5} portátil da 3M, série EVM-7

Medições	Nível, mínimo, máximo, média, nível de exposição de curto prazo (STEL), Tempo médio ponderado (TWA)
Medições em Tempo Real	Exibe a taxa atualizada uma vez por segundo
Tempo de Medição	1 a 30 segundos
Taxa de Fluxo	1,67 l/min.
Condições de operação	Faixa de Temperatura: 0°C a 50°C (32°F - 122°F) Faixa de Pressão: 65 kPa a 108 kPa Faixa de Umidade Relativa: 10% a 90%, sem condensação
Tamanho	19 cm X 19 cm X 7 cm (7,5" X 7,5" X 2,75")
Peso	1,3 kg (2.9 lb)
Carcaça	Carcaça em policarbonato ABS que dissipa estática
Sensores Inteligentes	Autodetectáveis, quando inseridos no modo desligado

Fonte: Catálogo 3M

Ao ser ligado, o equipamento realizava uma calibração automática por cerca de dois minutos antes de iniciar as medições. Após esse período, iniciava-se a medição da concentração de MP_{2,5}. Cada medição levava em média um minuto. O visor do equipamento apresentava as seguintes informações:

- Partículas (concentração em massa)
- Temperatura
- Umidade Relativa

Cada valor instantâneo era anotado em uma planilha manual. Ao todo eram realizadas de 6 a 8 medições em 30 a 40 minutos em cada local de amostragem. Posteriormente, esses resultados foram exportados para um computador, onde foram anexados em uma planilha e posteriormente realizado uma análise estatística descritiva utilizando o programa Microsoft Excel.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização meteorológica

Os dados meteorológicos para este estudo foram obtidos na página eletrônica do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) referentes à estação meteorológica de Uberlândia-MG e são apresentados a partir da Tabela 6, para os meses de janeiro a dezembro de 2022. A Tabela 6 apresenta uma síntese das seguintes variáveis para os dados meteorológicos para todo período estudado, compreendendo o mês de setembro em que foram realizadas as medições de MP_{2,5}, temperatura média mensal (°C); velocidade média vento mensal (m/s) e precipitação total mensal acumulada (mm).

Tabela 6: Indicadores meteorológicos mensais

Mês/Ano	Temperatura média mensal (°C)	Velocidade média vento mensal (m/s)	Precipitação total mensal (mm)	Umidade relativa do ar média mensal (%)	Pressão atmosférica média mensal (AUT) (mbar)
jan/22	23,58 ± 1,4	1,6	305	71,7	915
fev/22	23,41 ± 1,4	1,5	296,8	73,3	915,5
mar/22	24,86 ± 1,4	1,7	127,2	61,8	916,1
abr/22	24,45 ± 1,4	1,5	16,4	57,6	916,8
mai/22	20,30 ± 1,4	1,7	71,2	57,1	918,9
jun/22	20,84 ± 1,4	1,5	2,6	54,1	919,1
jul/22	21,65 ± 1,4	1,8	0	44	920
ago/22	22,57 ± 1,4	2	10,8	40,7	919,2
set/22	24,43 ± 1,4	2	66,2	46	917,2
out/22	24,09 ± 1,4	1,9	77,4	54	916,2
nov/22	23,37 ± 1,4	1,8	149	61,2	914,8
dez/22	23,17 ± 1,4	1,7	294	72,7	914,1

Fonte: Estação Meteorológica de Uberlândia (2022)

A temperatura média mais elevada foi registrada em março (24,9 °C), enquanto a menor temperatura média foi observada em junho (20,3 °C). É relevante destacar que esses valores não representam pontos instantâneos, mas sim médias mensais. A análise da tabela evidencia uma variação sazonal na temperatura do ar em Uberlândia, caracterizada por temperaturas mais baixas durante o inverno, e temperaturas mais elevadas na primavera, nos meses que antecedem o período de precipitação (CARVALHO et al., 2017).

A precipitação acumulada apresentou uma variação entre 0,0 e 305,0 mm, alcançando seu valor acumulado mais elevado (305,0 mm) em janeiro do ano de 2022. Por outro lado, o

menor valor médio foi registrado em julho, totalizando 0,0 mm de precipitação. A observação da Tabela 6 mostra claramente que no início do inverno, a precipitação foi praticamente inexistente (durante os meses de junho e julho), enquanto no início da primavera, a precipitação atingiu 66,2 mm. Os picos mais significativos de precipitação ocorreram durante o verão (janeiro e fevereiro), bem como no final da primavera, coincidindo com o início do período chuvoso. Estes elevados valores de precipitação promovem a redução da concentração de MP na atmosfera, pois a precipitação tem o efeito de lavar a atmosfera, removendo as partículas e outros gases poluentes presentes (SILVA, 2007). Ademais, a precipitação contribui para a diminuição da ressuspensão de poeira do solo, uma vez que a chuva promove sua fixação. É sabido que a ocorrência de precipitação está associada ao aumento da umidade do ar, como evidenciado pela semelhança nos perfis dessas variáveis comparando as duas colunas da Tabela 6.

A umidade relativa do ar apresentou seu menor valor médio em agosto (40,7%) e seu máximo em fevereiro (73,3%). A análise da Tabela 6 permite constatar que os valores mais baixos de umidade relativa ocorrem durante os meses do inverno (de junho a agosto), seguidos pelo início da primavera (em setembro). Como previsto, os valores mais elevados para esta variável são alcançados ao final da primavera (dezembro) e do verão (fevereiro e março) (PETRUCCI, 2018). O aumento da umidade favorece a aglomeração das partículas, resultando em um aumento de diâmetro e uma sedimentação mais fácil. Além disso, uma umidade mais alta pode induzir a um aumento na densidade das partículas, devido à maior adsorção de água (SILVA, 2007).

A tabela 6 apresenta a maior velocidade média do vento ao longo do período de estudo de 2,0 m/s dada no mês de agosto e setembro. A velocidade do vento influencia na velocidade de queda das partículas, dada por duas forças principais, sendo a gravidade e o atrito do ar. À medida que uma partícula é acelerada para baixo pela força gravitacional, sua velocidade aumenta, enquanto a resistência do ar atua na direção oposta, aumentando também. Eventualmente, essas forças se equilibram, resultando em uma velocidade constante de queda, conhecida como velocidade terminal. Partículas com diâmetros maiores têm velocidades terminais maiores, o que implica que as partículas $MP_{2,5}$ permaneçam em suspensão por períodos mais longos em comparação com as partículas de MP_{10} , devido às menores velocidades terminais associadas a estas últimas (AMORIM, 2004). Os resultados apresentados na tabela indicam que a velocidade do vento na região é relativamente baixa, menor que 5,0

m/s, o que representa uma maior dificuldade para a dispersão de poluentes suspensos (PETRUCCI, 2007).

A pressão atmosférica média diária variou entre 914,1 e 920 mbar, com uma média de 916,9 mbar. A análise dos dados revela um padrão distinto, demonstrando uma correlação entre as pressões máximas e as estações do inverno e primavera, e as mínimas com o verão e outono. Observa-se na Tabela 6 que dezembro apresentou a menor média de pressão, registrando 914,1 mB, o que favorece uma melhor dispersão de poluentes. Por outro lado, a maior média de pressão atmosférica foi registrada em julho.

Uma variável meteorológica crucial na avaliação da influência das fontes fixas de poluentes atmosféricos em uma determinada região é a compreensão da direção predominante dos ventos. No âmbito deste estudo, foi utilizada uma análise da rosa dos ventos apresentada na Figura 9, referente ao período de setembro de 2022, quando as medições de $MP_{2,5}$ foram realizadas, indica que as direções predominantes foram identificadas como sendo do Nordeste (NE).

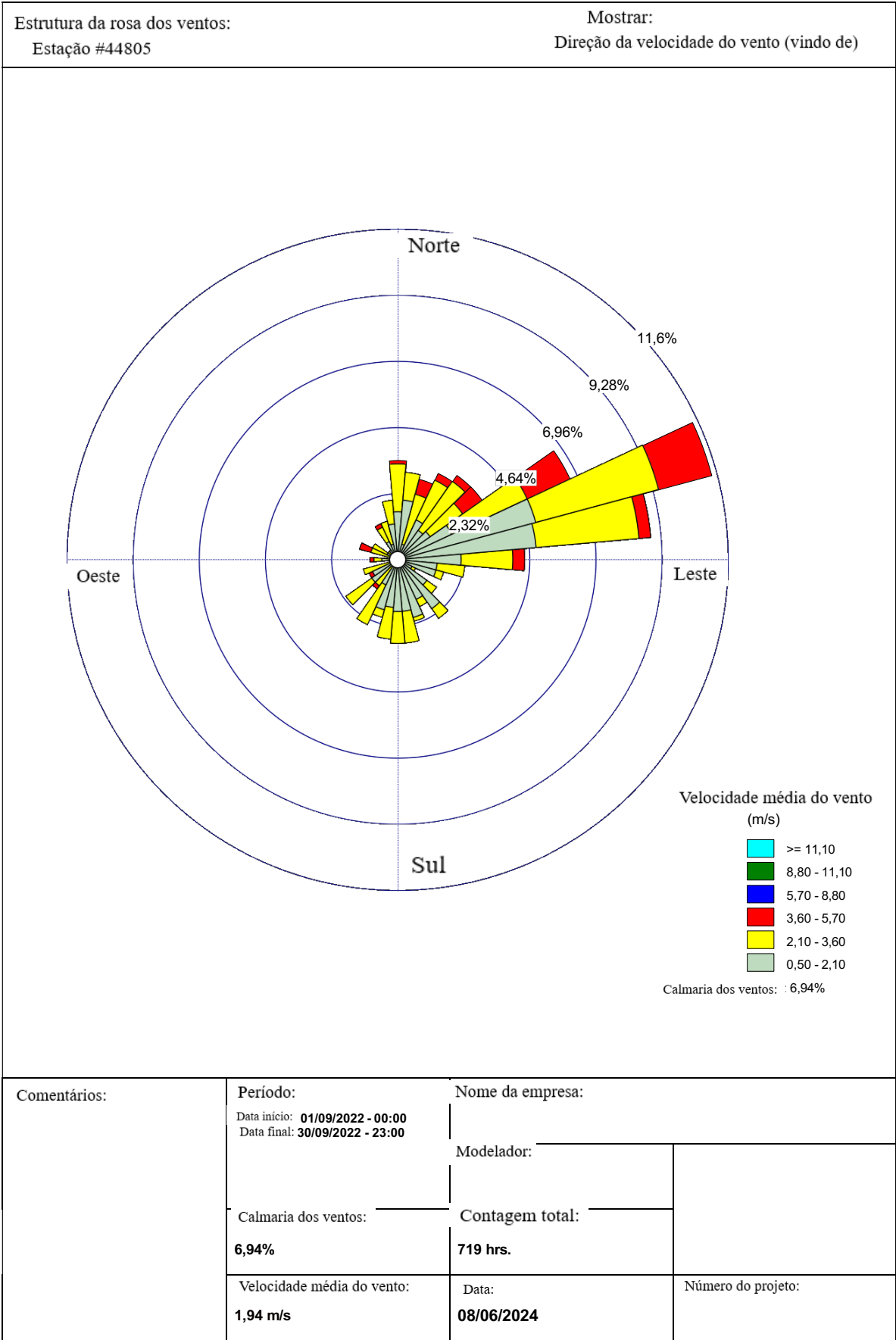


Figura 9 – Rosa dos ventos adaptada para o português. Fonte: Autor

5.2 Concentrações de MP2.5 e comparação com variáveis meteorológicas

No presente estudo, foram realizadas 34 medições válidas de concentração de material particulado fino (MP_{2,5}) entre 08/09/2022 e 27/09/2022. A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados de concentração de MP_{2,5} (µg/m³), Temperatura (°C) e Umidade (% UR) e o horário de amostragem de cada medição indicados pelo aparelho.

Tabela 7 – Dados de concentração MP2,5, temperatura e umidade.

Localização	Horário de Amostragem	Data	Concentração (µg/m ³)	Temperatura (°C)	Umidade (% UR)
Escola M1	14:35h	08/09/2022	14	29,3	44,0
	14:40h	08/09/2022	13	30,6	38,8
	14:45h	08/09/2022	11	30,9	37,4
	14:50h	08/09/2022	14	31,5	37,0
	14:55h	08/09/2022	10	31,5	37,2
	15:00h	08/09/2022	10	31,1	36,9
	15:05h	08/09/2022	11	31,0	37,8
	15:10h	08/09/2022	8	30,5	38,3
Escola M2	14:05h	12/09/2022	25	32,9	30,7
	14:10h	12/09/2022	27	33,1	30,9
	14:15h	12/09/2022	23	33,2	30,4
	14:20h	12/09/2022	24	33,4	31,3
	14:25h	12/09/2022	19	33,5	29,1
	14:30h	12/09/2022	20	33,5	29,4
Escola M3 noite	18:50h	13/09/2022	40	29,1	36,9
	18:55h	13/09/2022	41	31,3	33,2
	19:00h	13/09/2022	38	31,7	32,5
	19:05h	13/09/2022	31	31,9	31,6
	19:10h	13/09/2022	32	31,9	31,5
	19:15h	13/09/2022	30	32,0	31,8
Escola M3 dia	13:45h	19/09/2022	17	30,8	44,6
	13:50h	19/09/2022	16	31,2	44,8
	13:55h	19/09/2022	17	31,6	43,3
	14:00h	19/09/2022	15	31,8	43,9
	14:05h	19/09/2022	14	32,0	44,3
	14:10h	19/09/2022	13	31,9	44,9
	14:15h	19/09/2022	10	31,7	45,9
	14:20h	19/09/2022	13	31,6	45,9
Escola M4	14:10h	27/09/2022	9	29,2	42,4
	14:15h	27/09/2022	43	29,1	42,0
	14:20h	27/09/2022	19	29,1	38,8
	14:25h	27/09/2022	8	29,3	38,3
	14:30h	27/09/2022	4	29,5	38,7
	14:35h	27/09/2022	4	29,5	38,7

Fonte: Autor

A análise da Tabela 7 revela que as concentrações de $MP_{2,5}$ atingiram valores máximos em 13 de setembro, uma terça-feira, entre 18:50h e 19:15h, durante o período noturno. Esse aumento nas concentrações durante o período da noite pode ser consequência de uma série de fatores, incluindo eventos de inversão térmica, baixa velocidade do vento, o que dificulta a dispersão dos poluentes, influência de diferentes fontes emissoras de poluentes, tais como atividades industriais ou ainda em decorrência do tráfego veicular intensificado nas proximidades do local de amostragem. Medidas de poluentes atmosféricos em centros, são comumente associadas à concentração de alguns poluentes ser maior nos horários de maior fluxo de veículos, com picos observados das 8h às 11h e das 19h às 23h, devido às emissões de fontes móveis associadas ao aumento do tráfego veicular. Um estudo conduzido por WIKUATS, 2023, destaca que na década de 1990, São Paulo implementou restrições de circulação baseadas nos últimos dígitos das placas dos veículos em dias e horários específicos (das 7h às 10h e das 17h às 20h) para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos e aliviar o congestionamento do tráfego.

Além disso, o estudo de (WIKUATS, 2023) indica que os meses de julho, agosto e setembro apresentaram as maiores médias mensais de $MP_{2,5}$, correspondendo ao inverno no Brasil, um período caracterizado por níveis elevados de poluição atmosférica devido a condições atmosféricas estáveis e menores taxas de precipitação. Durante o inverno e início da primavera, a frequência de chuvas é reduzida, resultando em baixa umidade do ar, o que dificulta a deposição de partículas. Além disso, setembro de 2022 registrou ventos fracos, conforme indicado na Tabela 6, com velocidade média de 2,0 m/s (ventos são considerados fracos quando inferiores a 5 m/s), uma condição que favorece a baixa dispersão de poluentes. Especificamente no dia 13 de setembro, entre 18h e 19h, a direção predominante dos ventos foi noroeste ($333^\circ - 288^\circ$, respectivamente), coincidindo com a direção em que está localizado o ponto de amostragem (M3noite). Este fator pode ter contribuído para as altas concentrações de $MP_{2,5}$ registradas durante as medições. A área ao redor do ponto de amostragem é caracterizada pela presença de indústrias dos setores alimentício, tabaco e madeira, além de dois aterros sanitário, um ativo e outro desativado, que podem ser fontes significativas de MP (BOUBEL et al., 1994).

A menor concentração de $MP_{2,5}$ foi registrada na última medição, realizada em 27 de setembro. Essa data também apresentou precipitação significativa, conforme descrito na Tabela 8, que detalha os dados diários de chuva, umidade, velocidade média do vento e temperatura ao longo de setembro. Observou-se que 66,5% de toda a precipitação mensal ocorreu nesse dia. É

provável que as baixas concentrações de $MP_{2,5}$ estejam associadas à precipitação ocorrida, uma vez que foram registrados 37,8 mm de chuva antes da primeira medição, realizada às 14:10h, já que esta tem o efeito de "limpar" a atmosfera, removendo as partículas presentes (SILVA, 2007). Além disso, o $MP_{2,5}$ é um tipo de poluente bastante solúvel em água, o que facilita sua remoção por deposição úmida (SEINFELD E PANDIS, 2006). A concentração média de $MP_{2,5}$, calculada a partir de todas as medições realizadas, foi de $19,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esse valor suscita preocupações significativas, pois representa níveis elevados de poluição, ainda que não se trate de uma média de 24h, indica um alerta. WHO, 2021 recomenda que a média de exposição de $MP_{2,5}$ em um período de 24 horas não deve exceder 15 microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Esta diretriz é parte de um conjunto de recomendações que visam proteger a saúde pública, especialmente considerando os efeitos adversos a saúde.

Tabela 8 – Dados de precipitação, temperatura e umidade total diários mês setembro.

Data Medição	Precipitação Total, Diário (mm)	Temperatura Média, Diária (°C)	Umidade Relativa do Ar, Média Diária (%)	Vento Velocidade Média Diária (m/s)
01/09/2022	0	21,3	38	2,7
02/09/2022	0	21,9	32,8	2,3
03/09/2022	0	24,7	31,4	1,4
04/09/2022	0	25,9	32,4	1,1
05/09/2022	0	25,2	37,5	1,9
06/09/2022	0	24,6	41	3,3
07/09/2022	0	23,4	41,7	3
08/09/2022	0	24,7	35,9	2,3
09/09/2022	0	26,3	31	2,2
10/09/2022	0	27	25,9	1,4
11/09/2022	0	28,1	25,7	0,9
12/09/2022	0	28,5	26,6	1,8
13/09/2022	0	29	21	2,2
14/09/2022	0	28,5	24	2,1
15/09/2022	0	21,9	58,5	2,3
16/09/2022	0	22,3	63,3	2
17/09/2022	0	23	58,2	1,7
18/09/2022	0	24,2	48,2	2,3
19/09/2022	0	26,5	41,9	2,1
20/09/2022	0	24,8	58,1	1,9
21/09/2022	0	26,1	53,6	1,3
<u>22/09/2022</u>	<u>8,2</u>	21,5	80,9	1,3
<u>23/09/2022</u>	<u>3</u>	20,9	66,5	2
24/09/2022	0	22,9	30,5	1,5
25/09/2022	0	25,6	37,6	2,5
26/09/2022	0	26,3	52,2	2
<u>27/09/2022</u>	<u>44</u>	19,7	86,8	1,4
<u>28/09/2022</u>	<u>10,8</u>	21,4	73,2	1,5
<u>29/09/2022</u>	<u>0,2</u>	23,3	64,1	2
30/09/2022	0	23,5	63,1	2,3

Fonte: Inmet (2022)

Para exemplificar, a Tabela 8 evidencia que, durante o período de 1º a 30 de setembro, a precipitação pluviométrica totalizou 66,2 mm. Além disso, a umidade média nesse intervalo

foi de aproximadamente 46%, a velocidade média de vento foi de 2,2 m/s e a temperatura média girou em torno de 24°C (com mínima e máxima de 19,7 °C e 29 °C). Esses resultados estão em conformidade com as informações encontradas na literatura, que indicam que o inverno, iniciado em junho e encerrado em setembro, é caracterizado por uma baixa precipitação mensal e um período reconhecido como um dos mais secos do ano, coincidindo com o término da estação invernal. Além disso, o mês de setembro é caracterizado predominantemente por ventos fracos (PETRUCCI, 2007).

Paralelamente, essa etapa do trabalho teve o intuito de comparar a concentração média de MP_{2,5} no período de estudo (setembro/2022) com as concentrações médias mensais históricas de anos anteriores conduzidas por outros estudos da literatura. Infelizmente, a cidade de Uberlândia não possui uma estação de qualidade do ar, o que impede uma comparação mais robusta. No entanto, os resultados medidos neste estudo foram comparados com o estudo conduzido por LIMA, 2007. Para isso, foram utilizadas as informações constantes na Tabela 3 em comparação com os dados reunidos através de uma análise estatística descritiva com as médias encontradas nos dias em que foram realizadas as medições do presente trabalho no mês de setembro de 2022, que estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9: Análise Estatística Descritiva dos Valores de Concentração MP_{2,5} (µg/m³).

	M1	M2	M3noite	M3dia	M4	LIMA (2007)
Média	11,4	23	35,3	14,4	14,5	8,2
Erro padrão	0,7	1,2	1,9	0,8	6,1	2,0
Desvio Padrão	2,1	3,0	4,8	2,4	15,0	14,3
Mínimo	8	19	30	10	4	0
Máximo	14	27	41	17	43	75,6

Fonte: Autor

No ponto de amostragem M1, a média de MP_{2,5} foi de 11,4 µg/m³, com um erro padrão de 0,7 e um desvio padrão de 2,1. Os valores mínimo e máximo foram de 8 e 14 µg/m³, respectivamente.

No ponto M2, observou-se uma média de MP_{2,5} de 23 µg/m³, com um erro padrão de 1,2 e um desvio padrão de 3,0. Os valores mínimo e máximo foram de 19 e 27 µg/m³, respectivamente.

O ponto M3 na primeira medição apresentou a maior média de $MP_{2,5}$, registrando $35,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um erro padrão de 1,9 e um desvio padrão de 4,8. Os valores mínimo e máximo foram de 30 e $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

No ponto M3, na segunda medição a média de $MP_{2,5}$ foi de $14,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um erro padrão de 0,8 e um desvio padrão de 2,4. Os valores mínimo e máximo foram de 10 e $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

O ponto M4 registrou uma média de $MP_{2,5}$ de $14,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um erro padrão de 6,1 e um desvio padrão de 15,0. Os valores mínimo e máximo foram de 4 e $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Os dados obtidos em LIMA (2007) revelaram uma média de $MP_{2,5}$ de $8,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um erro padrão de 2,0 e um desvio padrão de 14,3. Os valores mínimo e máximo foram de 0 e $75,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. As divergências observadas em relação ao presente estudo podem ser atribuídas a diversos fatores, incluindo a diferença na metodologia de amostragem utilizada por LIMA (2007), que envolveu medições a cada seis dias ao longo de um ano, assim como os equipamentos utilizados durante a realização da coleta dos dados. Adicionalmente, variações nas fontes de emissão, padrões de vento e condições meteorológicas entre as áreas estudadas também podem contribuir para essas diferenças. Por se tratar de um estudo contendo medidas durante todos os períodos do ano, é esperado que apresente maior variabilidade nos valores de concentrações medidas, o que pode ser observado por meio do elevado desvio padrão.

Os valores encontrados neste trabalho apresentaram concentrações médias significativamente mais altas em todas as medições realizadas em comparação com os valores do estudo anterior. Para exemplificar, no dia 08/09/2022, no ponto de M1, a concentração média de $MP_{2,5}$ foi medida em $11,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondendo a um aumento de 38% da média encontrada no estudo anterior, de $8,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Apesar de exceder os resultados prévios, esse valor permaneceu dentro dos limites estabelecidos pelo CONAMA 491/2018, de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ademais, em 13/09/2022, no ponto de M3noite o valor registrado foi de $35,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando em 330% os resultados do estudo anterior, e ultrapassando os limites da norma. É importante destacar que o CONAMA estabelece médias de 24 horas, mas não foi possível calculá-las neste estudo. Assim, os valores encontrados aqui servem apenas como parâmetros iniciais para orientar estudos futuros.

É importante destacar que as médias registradas no ponto de M3noite e M3dia apresentaram variações significativas durante as duas medições realizadas ($35,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $14,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente). Em contraste com a segunda medição, realizada durante o período

diurno no dia 19 de setembro ($14,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), observou-se que os valores de M3noite excederam mais que o dobro os registros de M3dia. Essa disparidade sugere uma variabilidade no ciclo diário na concentração de material particulado, com uma notável discrepância entre as medições diurna e noturna. Este fato sugere mudanças na intensidade dos emissores ou a presença de fontes emissoras diferentes ou das condições meteorológicas. Além disso, uma pequena variação na direção predominante dos ventos foi observada, M3noite a direção predominante era noroeste (entre 288° e 333°), em contrapartida M3dia a direção predominante foi nordeste (entre 2° e 18°) no período da realização das medições. De toda forma, parece que os ventos em M3dia e M3noite vieram predominantemente de norte, e os arredores do local como já mencionado anteriormente, é composto em seu entorno por várias indústrias dos setores alimentício, tabagista e de madeira. Esses dados estão detalhados na Tabela 10. Vale ressaltar que não houve precipitação em nenhum dos dois dias.

Tabela 10 – Direção do vento (°)

Hora	M3noite (13/09/2022)	M3dia (19/09/2022)
00:00	71	86
01:00	62	121
02:00	55	74
03:00	44	89
04:00	31	71
05:00	29	81
06:00	39	66
07:00	25	55
08:00	7	82
09:00	30	79
10:00	14	76
11:00	23	77
12:00	15	38
<u>13:00</u>	20	<u>18</u>
<u>14:00</u>	10	<u>2</u>
15:00	333	343
16:00	335	342
17:00	354	357
<u>18:00</u>	<u>333</u>	32
<u>19:00</u>	<u>288</u>	52
20:00	299	297
21:00	332	9
22:00	354	9
23:00	68	1

Fonte: Inmet (2022)

A análise estatística descritiva dos dados também revelou os valores de desvio padrão e erro padrão da média para as medições de $MP_{2.5}$ em cada ponto de amostragem. Nos pontos de amostragem M1, M2 e M3dia e M3noite, o erro padrão é relativamente baixo em comparação com o desvio padrão, o que sugere uma boa precisão das estimativas das médias amostrais em relação à dispersão dos dados. Isso indica uma consistência razoável nas médias amostrais nessas localidades. No entanto, no ponto de amostragem M4, há uma diferença significativa entre o erro padrão e o desvio padrão, com o erro padrão sendo consideravelmente menor do que o desvio padrão. Isso sugere que apesar da alta dispersão dos dados em torno da média amostral, as estimativas da média são relativamente precisas nesse ponto de amostragem.

A análise comparativa dos valores máximos e mínimos em cada ponto de amostragem permite avaliar a extensão da variação das concentrações de $MP_{2,5}$ ao longo dos distintos locais de estudo. Nos pontos de amostragem M1 e M3dia, mostrou-se uma discreta diferença entre os valores máximos e mínimos, com variações baixas em termos de unidades de $\mu g/m^3$. Essa observação sugere uma menor dispersão das concentrações de $MP_{2,5}$ nesses locais específicos.

Por outro lado, nos pontos de amostragem M2, M3noite e M4, identificou-se uma variação mais distinta entre os valores máximos e mínimos, acentuando diferenças mais significativas nas concentrações registradas. Essa maior amplitude na variação sugere uma maior heterogeneidade nas concentrações de $MP_{2,5}$ nesses locais.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada das medições experimentais das concentrações de $MP_{2,5}$ sugerem baseado nas características locais, que possivelmente as indústrias e os veículos automotores são os principais fatores contribuintes para a poluição atmosférica na região estudada. A série de dados de concentração revelou que os resultados apresentaram variabilidade no decorrer do período selecionado. A oscilação observada exibe característica pontual e alguns episódios de altas concentrações podem ser atribuídos à ocorrência de dias com baixo índice pluviométrico, mudanças de direção do vento, ciclo diário, umidade relativa e com condições desfavoráveis à dispersão. Além disso, foi possível sugerir que as baixas temperaturas e a fraca circulação de ventos durante a noite, bem como a baixa umidade, poderiam intensificar a concentração de poluentes, potencializando os riscos à saúde respiratória, especialmente em crianças.

Em comparação com a restrita literatura, os resultados encontrados neste estudo apresentaram concentrações médias significativamente mais altas em todas as medições realizadas. As divergências observadas podem ser atribuídas a diferença na metodologia de amostragem, como método, duração e espaçamento dos dados. Além de variações nas fontes de emissão, padrões de vento e condições meteorológicas entre as áreas estudadas.

Além disso, é de extrema urgência a necessidade de estações de monitoramento da qualidade do ar na cidade de Uberlândia seguindo as recomendações de medidas conforme previsto no CONAMA 491/2018. O conhecimento da variação temporal e espacial da concentração de poluentes atmosféricos em uma dada região é de extrema importância para a adoção de medidas regulatórias que previnam a ocorrência de episódios severos de poluição, sendo de responsabilidade da administração pública, no intuito de manter o controle dos níveis

de poluição e proteger a saúde dos cidadãos. Portanto, recomenda-se que medidas de $MP_{2,5}$ e de outros poluentes atmosféricos sejam realizadas abrangendo um número maior de escolas da rede de Uberlândia e por um período mais longo que permita o estudo em diferentes épocas do ano. Sendo assim, é imprescindível a promoção de estudos contínuos para monitorar a evolução da qualidade do ar, com o objetivo de implementar medidas preventivas eficazes que reduzam a exposição das crianças a níveis prejudiciais de poluentes. A orientação e supervisão de futuros estudos similares são essenciais para garantir a consistência dos dados e a eficácia das ações mitigadoras propostas.

REFERÊNCIAS

- AMATO, F. et al. Sources of indoor and outdoor $PM_{2.5}$ concentrations in primary schools. *Science of the Total Environment*, The, v. 490, p. 757–765, 2014
- BAIRD, Colin. Química ambiental. Reverté, 2018.
- BOÇON, F. T. Modelagem matemática do escoamento e da dispersão de poluentes na microescala atmosférica. 1998. 290f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- BOUBEL, R. et al. Fundamentals of air pollution. 3. ed. San Diego, CA: Academic Press, 1994.
- BOUBEL, R. et al. Fundamentals of air pollution. 3. ed. San Diego, CA: Academic Press, 1994.
- BRASIL. (2018). Resolução CONAMA no 491, de 19 de Novembro de 2018. https://www.in.gov.br/web/guest/materia/_asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895d01-2018-11
- DE AMORIM, Wanda Batista. Monitoramento da concentração e caracterização do material particulado suspenso na atmosfera. 2004. Tese de Doutorado. [sn].
- DE CARVALHO, Débora Teixeira Lemos et al. Compartimentação e evolução do relevo da chapada Uberaba-Uberlândia-MG. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*, v. 1, p. 5967-5978, 2017.
- DERISIO, J. C. Introdução ao Controle de Poluição Ambiental. São Paulo, CETESB. 1992.

EIDT, Carina Saraiva. Mapeamento dos níveis de poluição atmosférica em torno de escolas públicas da cidade de Porto Alegre. 2013. 60 f. Dissertação (Mestrado em Pediatria e Saúde da Criança) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília, 2006. Disponível na internet em <http://www.embrapa.br>

FERNANDES, Karenn Silveira. Material particulado fino (Mp2,5) interno de um ambiente escolar urbano influenciado pela queima de indústrias oleicas. 2017. 85 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

FERNANDES, Marcus Vinícius de Oliveira et al. Simulação da concentração de material particulado inalável de origem veicular em uma interseção sinalizada de Uberlândia-MG. 2013.

GOMES, Simone et al. Análise da concentração mássica de materiais particulados provenientes da combustão de diesel e biodiesel Analysis of the mass concentration of particulate matter from the combustion of diesel and biodiesel. *Ambiência*, v. 9, n. 2, p. 335-348, 2013.

HINDS, W. C. *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York, 1982.

HOINASKI, Leonardo. Avaliação de métodos de identificação de fontes emissoras de material particulado inalável (MP10). 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis.

JACOBSON, L. D. S. V. et al. Acute effects of particulate matter and black carbon from seasonal fires on peak expiratory flow of schoolchildren in the brazilian Amazon. *PloS ONE*, v. 9, n. 8, p. e104177, 2014.

KIKUO, O., *Trace Analysis of Atmospheric Samples*. Tokyo, Japão, 1977.

LENZI, Ervim; FAVERO, Luzia Otilia Bortotti. *Introdução à Química da Atmosfera: Ciência, vida e sobrevivência*. Grupo Gen-LTC, 2000.

LIDÉN, G. Performance parameters for assessing the acceptability of aerosol sampling equipment. *Analyst*, v 119, 1994.

LIMA, Euclides Antônio Pereira de et al. Um estudo sobre a qualidade do ar de Uberlândia: material particulado em suspensão. 2007.

LIRA, Taisa Shimosakai de et al. Modelagem e previsão da qualidade do ar na cidade de Uberlândia-MG. 2009.

MANAHAN, S. E. Fundamentals of environmental chemistry. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001.

MARQUES, Liliana Rute Dias. Qualidade do ar interior em instalações desportivas. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro (Portugal).

McKENNA, J. D.; TURNER, J. H.; McKENNA Jr., J. P. Fine particle (2.5 microns) emissions: regulation, measurement, and control. Hoboken: Wiley, 2008, 257p.

NICODEMOS, R. M. et al. Estudo da relação entre concentração de MP10 e doenças respiratórias na cidade de Uberlândia-MG. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 8, 2009, Anais do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Uberlândia, julho 2009.

PETRUCCI, Eduardo et al. Características do clima de Uberlândia-MG: análise da temperatura, precipitação e umidade relativa. 2018.

QUEIROZ, Paula Guimarães Moura; JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano; MENEZES, Maria Ângela de Barros Correia. Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas Gerais. Química Nova, v. 30, p. 1233-1239, 2007.

RODRIGUES, Poliany Cristiny de Oliveira et al. Variabilidade climática aumenta a morbimortalidade associada ao material particulado. Revista de Saúde Pública, v. 51, p. 91, 2017.

SANTOS, A. M. A., O tamanho das partículas de poeira suspensas no ar dos ambientes de trabalho, Fundacentro, S.P., 2001. 96p.

SEINFELD E PANDIS. S.N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate changes. New York, John Wiley e Sons, 1998, 1326p.

SILVA, Marcelo Gonçalves da. "Análise da qualidade do ar com base no fluxo de veículos e variáveis climáticas: o caso da cidade de Uberlândia-MG." (2007).

VALLERO, D. A. Fundamentals of air pollution. 4 ed., Oxford: Academic Press, 2008, 948p.

VARELLA, D. BRONQUITE DOENÇAS E SINTOMAS. Disponível em <https://drausioarella.com.br/doencas-e-sintomas/bronquite/> Acesso em 02 de abril de 2024.

VICENT J. H.; Mark, D. Entry characteristics of practical workplace aerosol samplers in relation to the ISO recommendations. *Ann. Occup. Hyg.* V. 34, 1990.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. *Atmospheric science: an introductory survey*. Elsevier, 2006.

WIKUATS, Caroline Fernanda Hei et al. Health Risk Assessment of Exposure to Air Pollutants Exceeding the New WHO Air Quality Guidelines (AQGs) in São Paulo, Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 9, p. 5707, 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION et al. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization, 2021.