



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

CÍCERO JANDERSON TAVARES NEVES

AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR E DO CONFORTO TÉRMICO EM UMA
ÁREA URBANA NA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL

FORTALEZA

2022

CÍCERO JANDERSON TAVARES NEVES

AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR E DO CONFORTO TÉRMICO EM UMA ÁREA
URBANA NA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo.

Coorientador: Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N511a Neves, Cícero Janderson Tavares.
 AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR E DO CONFORTO TÉRMICO EM UMA ÁREA URBANA NA
 CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL / Cícero Janderson Tavares Neves. - 2022.
 82 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
 Campus Fortaleza, 2022.
 Orientação: Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo.
 Coorientação: Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva.
1. Poluição do ar. 2. Ambiente urbano. 3. Monitoramento. 4. Conforto térmico. I. Título.
- CDD 628
-

CÍCERO JANDERSON TAVARES NEVES

AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR E DO CONFORTO TÉRMICO EM UMA ÁREA
URBANA NA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Profa. Dra. Lara Sucupira Furtado
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por estar presente em todos os momentos da minha vida, principalmente os mais difíceis.

Aos meus pais e irmão pelo apoio incondicional, incentivo e atenção.

Aos professores Dr. Rinaldo dos Santos Araújo (orientador) e Dr. Adeildo Cabral da Silva (coorientador) pela orientação e assistência prestados antes e durante esta pesquisa.

A todos os amigos e companheiros de laboratório (LTQ e LERCA) que fizeram parte dessa caminhada e contribuíram no meu crescimento profissional e pessoal.

A FUNCAP pelo aporte financeiro (bolsa) concedido para a realização da presente dissertação.

RESUMO

A poluição do ar representa um grande problema ambiental e de saúde pública em diversos centros urbanos e sua origem é principalmente relacionada a emissão de poluentes atmosféricos de origem veicular e industrial. Em adição, as variáveis meteorológicas possuem participação direta nas variações das concentrações de poluentes no ar e interferem nos níveis de conforto térmico humano. Neste contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a qualidade do ar e o conforto térmico em uma área urbana na cidade de Fortaleza, Ceará, no período de setembro de 2021 a março de 2022. Experimentalmente foram determinados os parâmetros atmosféricos de temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, velocidade dos ventos, PTS, MP₁₀, MP_{2,5}, O₃, COVT e CO₂. As coletas dos poluentes do ar foram realizadas a cada 6 dias e as características de conforto térmico foram determinadas a partir dos índices térmicos de calor (IC), de desconforto térmico de Thom (IDT), de temperatura efetiva em função do vento (TEv) e da temperatura superficial de alguns materiais construtivos presentes no local de estudo. Os resultados mostraram concentrações médias diárias dos materiais particulados de 37,9 µg/m³ de PTS; 25,4 µg/m³ de MP₁₀ e 19,9 µg/m³ de MP_{2,5}; as quais são inferiores aos padrões atmosféricos estabelecidos pela legislação brasileira. Particularmente, o particulado inalável fino (< 2,5 µm) excedeu em 90% das campanhas o limite recomendado de 15 µg/m³ recomendado pela Organização Mundial de Saúde. Em relação aos níveis médios diários de COVT e CO₂ e de O₃ (8 h) foram encontradas concentrações de 256,2 ppb, 566,3 ppm e 39,8 µg/m³, respectivamente. Em geral, a qualidade do ar na área urbana foi caracterizada como “boa”, conforme o padrão brasileiro. Os níveis de conforto térmico representados pelos índices empíricos de IC, IDT e TEv mostraram que o ambiente em estudo apresenta nível de calor nas faixas de “cautela extrema”, “desconforto térmico” e sensação térmica de “levemente quente” em 45% dos dias avaliados. Dentre os materiais construtivos avaliados a pedra mineira e a grama foram os que apresentaram melhor desempenho térmico superficial, principalmente no período da tarde.

Palavras-chave: Poluição do ar. Ambiente urbano. Monitoramento. Conforto térmico.

ABSTRACT

Air pollution represents a major environmental and public health problem in several urban centers and its origin is mainly related to the emission of atmospheric pollutants from vehicular and industrial sources. In addition, meteorological variables play a direct role in variations in pollutant concentrations in the air and interfere with human thermal comfort levels. In this context, this study aims to evaluate air quality and thermal comfort in an urban area in the city of Fortaleza, Ceará, from September 2021 to March 2022. Atmospheric parameters of air temperature, relative humidity, rainfall, wind speed, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, TVOC and CO₂ were experimentally determined. The air pollutants were collected every 6 days and the thermal comfort characteristics were determined from the thermal indexes of heat (HI), discomfort of Thom (DIT), effective temperature as a function of wind (ET_w) and surface temperature of some building materials present at the study site. The results showed average daily concentrations of particulate matter of 37.9 µg/m³ of TSP; 25.4 µg/m³ of PM₁₀ and 19.9 µg/m³ of PM_{2.5}, which are lower than the atmospheric standards established by Brazilian legislation. In particular, the fine inhalable particulate (< 2.5 µm) exceeded the recommended limit of 15 µg/m³ recommended by the World Health Organization in 90% of the campaigns. On the other hand, the average daily levels of VOC and CO₂ and O₃ (8 h) showed concentrations of 256.2 ppb, 566.3 ppm and 39.8 µg/m³, respectively. In general, the air quality in the urban area was characterized as “good”, according to the Brazilian standard. The levels of thermal comfort represented by the empirical indexes of HI, DIT and ET_w showed that the environment under study presents a level of heat in the ranges of "extreme caution", "thermal discomfort" and thermal sensation of "slightly hot" in 45% of the monitored days. Among the construction materials evaluated, stone from Minas Gerais and grass were the ones that presented the best surface thermal performance, especially in the afternoon.

Keywords: Air pollution. Urban environment. Monitoring. Thermal comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Localização da área de monitoramento no trecho urbano em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	34
Figura 2 — Estação meteorológica usada nos estudos de monitoramento.....	35
Figura 3 — Amostradores Hivol HVS 3000® para coleta dos particulados: PTS, MP ₁₀ e MP _{2,5}	36
Figura 4 — Monitor de ozônio usados no monitoramento atmosférico na área em estudo.....	37
Figura 5 — Sensor HOBO data logger equipado com 2 canais externos (CO ₂ e COVT)....	37
Figura 6 — Câmara termográfica usado nos estudos de conforto térmico nas dependências da área em estudo.....	41
Figura 7 — Rosas dos ventos e frequência de intensidade dos ventos na área em estudo no período de 22/09/2021 a 21/03/2022.....	42
Figura 8 — Parâmetros meteorológicos observados no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	43
Figura 9 — Concentrações de MP _{2,5} (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	46
Figura 10 — Concentrações de MP ₁₀ (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	47
Figura 11 — Concentrações de PTS (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	47
Figura 12 — Concentrações médias de O ₃ (8 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	50
Figura 13 — Concentrações médias de COVT (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	52
Figura 14 — Concentrações de CO ₂ (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	53
Figura 15 — Índices de qualidade do ar (IQAr) para diferentes poluentes no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará....	55
Figura 16 — Índice de calor (IC) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	58

Figura 17— Índice de desconforto de Thom (IDT) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	60
Figura 18— Temperatura efetiva em função do vento (TEv) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	62
Figura 19— Imagens termográficas da temperatura superficial máxima dos materiais selecionados presentes na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Estrutura do índice de qualidade do ar.....	39
Tabela 2 — Faixas de alerta do Índice de calor (IC) e seus efeitos a saúde humana.....	40
Tabela 3 — Faixas de classificação do índice de desconforto de Thom (IDT) ajustado a cidade de João Pessoa *	40
Tabela 4 — Faixas de sensação da temperatura efetiva em função do vento (TEv).....	40
Tabela 5 — Variáveis meteorológicas observadas no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	44
Tabela 6 — Concentração diária dos poluentes no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.....	45
Tabela 7 — Matriz de correlação para os poluentes atmosféricos e parâmetros meteorológicos no monitoramento da qualidade do ar no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará...	57
Tabela 8 — Teste de normalidade Shapiro-Wilk.....	57
Tabela 9 — Temperatura média superficial dos elementos construtivos no período de 22/09/2021 a 27/12/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará...	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Tipos de fontes de emissão de poluentes atmosféricos.....	15
Quadro 2 — Tipos de rede de monitoramento da qualidade do ar.....	20
Quadro 3 — Padrões de qualidade do ar vigentes no Brasil.....	22
Quadro 4 — Padrões de qualidade do ar em vigor nos Estados Unidos.....	23
Quadro 5 — Padrão europeu de qualidade do ar em vigência.....	24
Quadro 6 — Valores adicionais para MP _{2,5} conforme o indicador de exposição média (IEM).....	25
Quadro 7 — Comparativo entre os valores limites sugeridos pela OMS em 2005 e 2021..	25
Quadro 8 — Concentrações para tempos médios curtos de NO ₂ , SO ₂ e CO.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	Amostrador de Grande Volume
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
COVT	Compostos Orgânicos Voláteis Totais
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IQAr	Índice de Qualidade do Ar
MP	Material Particulado
OMS	Organização Mundial de Saúde
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
IQR	Intervalo interquartis
PTS	Partículas Totais em Suspensão
MP ₁₀	Material Particulado de diâmetro menor ou igual a 10 µm
MP _{2,5}	Material Particulado de diâmetro menor ou igual a 2,5 µm
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
ppm	Partes por milhão
ppb	Partes por bilhão
ppmv	Partes por milhão em volume
ppbv	Partes por bilhões em volume
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
EC	Comunidade Europeia
AVC	Acidente Vascular Cerebral
NBR	Norma Brasileira
IEM	Indicador de Exposição Média
IDT	Índice de Desconforto de Thom
IC	Índice de Calor
ITU	Índice de Temperatura e Umidade
TEv	Temperatura Efetiva em função do vento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo Geral.....	14
2.2	Objetivos Específicos.....	14
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3.1	Poluição do Ar.....	15
3.2	Monitoramento da Qualidade do Ar.....	16
3.2.1	<i>Principais poluentes.....</i>	<i>16</i>
3.2.2	<i>Técnicas de amostragem e redes de monitoramento.....</i>	<i>18</i>
3.3	Padrões de Qualidade do Ar.....	21
3.4	Qualidade do Ar e Saúde Humana.....	28
3.5	Conforto Térmico Urbano.....	29
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
4.1	Caracterização da Área da Pesquisa.....	34
4.2	Monitoramento dos Parâmetros Meteorológicos.....	35
4.3	Monitoramento dos Poluentes Atmosféricos.....	35
4.4	Monitoramento do Conforto Térmico.....	39
4.5	Análises Estatísticas.....	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1	Estudos Meteorológicos.....	42
5.2	Estudos de Poluição do Ar.....	45
5.3	Estudos de Conforto Térmico.....	58
6	CONCLUSÕES.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A poluição do ar é um problema enfrentado em escala mundial pela sociedade civil, porém, os grandes centros urbanos, os quais detêm as maiores frotas de veículos e atividades industriais, são os que mais sofrem com os efeitos da degradação da qualidade do ar. Notadamente, diversas pesquisas mostram que a poluição atmosférica prejudica o meio ambiente e a saúde humana elevando os níveis de hospitalização e mortalidade por doenças cardíacas e respiratórias (KARIMI; SHOKRINEZHAD; SAMADI, 2019).

É consenso que a adoção de padrões de qualidade do ar mais rígidos para os particulados em regiões metropolitanas brasileiras promove redução das hospitalizações e mortalidade devido a doenças relacionadas a poluição atmosférica (ANDREÃO *et al.*, 2020).

No tocante as legislações nacional e internacional, os principais poluentes de interesse presentes no ar, com limites definidos para fins de monitoramento são: as partículas totais em suspensão (PTS), as partículas inaláveis (MP₁₀) e inaláveis finas (MP_{2,5}); os gases inorgânicos representados pelo O₃, SO₂, NO₂ e CO e o metal Pb (BRASIL, 2018; EPA, 2015; WHO, 2021).

Gouveia e Junger (2018) ao avaliarem a qualidade do ar em grandes cidades da América Latina (México, Santiago, São Paulo e Rio de Janeiro) verificaram concentrações de poluentes acima do recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), o que tem trazido impactos negativos a saúde, principalmente de crianças.

Particularmente, no Estado do Ceará ainda não existe uma rede de monitoramento da qualidade do ar como existem em outros estados nordestinos como Bahia e Pernambuco. Na Bahia, o monitoramento da qualidade do ar não é de responsabilidade do estado e adota-se um sistema descentralizado de gestão com pouca divulgação dos dados, enquanto, no Pernambuco encontram-se em atividade 4 estações de monitoramento (1 pública e 3 privadas). Comparativamente o estado do Rio de Janeiro possui maior destaque no monitoramento da poluição do ar no país, com 161 estações ativas, sendo 65 de natureza pública e 96 ligadas a iniciativa privada (VORMITTAG *et al.*, 2021).

A Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) dispõe de duas estações de monitoramento da qualidade do ar, sendo uma fixa e uma móvel, as quais são capazes de quantificar a concentração de poluentes como: PTS, MP₁₀, MP_{2,5}, SO₂, NO_x, NO₂, NO, O₃, CO, hidrocarbonetos (HC), hidrocarbonetos não-metânicos (NMHC), metano, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, além das variáveis meteorológicas representadas pela temperatura, umidade do ar, direção e intensidade dos ventos (SEMACE, 2020), entretanto,

estes equipamentos apresentam funcionamento intermitente, o que dificulta a coleta, disponibilidade e aplicabilidade dos dados.

Em um estudo anterior de investigação da poluição atmosférica na cidade de Fortaleza, Lima (2015) realizou extenso monitoramento de poluentes como materiais particulados, gases inorgânicos (NO_2 , SO_2 e NH_3), fumaça e carbono negro. Este autor relatou concentrações médias de PTS, MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$ de $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $31,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ e $21,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$; respectivamente, as quais denotam um nível bom de qualidade do ar no período analisado.

Além da qualidade do ar outro campo de estudo relevante relacionado aos fenômenos atmosféricos diz respeito ao conforto térmico associado a emissão de gases de efeito estufa e a expansão urbana, os quais tem contribuído para as mudanças climáticas e formação de ilhas de calor com consequente deterioração do bem-estar humano nas grandes cidades.

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas a temperatura do ar na superfície terrestre teve um aumento estimado de $1,07^\circ\text{C}$ no decorrer dos anos 2010 a 2019 comparado ao período entre 1850 e 1900, sendo atribuído aos gases de efeito estufa a responsabilidade por este aquecimento. Do ponto de vista técnico, o CO_2 é considerado o principal agente causador das alterações climáticas. Em 1850 a concentração de CO_2 na superfície global era de $285,5 \pm 2,1 \text{ ppm}$ alcançando $409,9 \pm 0,4 \text{ ppm}$ em 2019 (IPCC, 2021).

Estudos de Cai *et al.* (2018a) relataram que um crescimento urbano de 1% favorece a elevação de 0,9% nas emissões de CO_2 . Ryswyk *et al.* (2019), Melo e Freitas (2020), Novais *et al.* (2018) e Marques *et al.* (2019) propõem que a utilização de áreas com maior grau de vegetação, planejamento urbano e ventilação podem oferecer benefícios tanto para questão do conforto térmico como da qualidade do ar local.

Diante do exposto, destaca-se que o monitoramento dos níveis e/ou indicadores da poluição do ar e do conforto térmico são estudos necessários para se avaliar (e conhecer) o impacto destas alterações antrópicas sobre a qualidade de vida das populações em ambientes urbanos. Em termos, a partir dos dados gerados nestes estudos acredita-se que se pode constituir conhecimentos que favoreçam a elaboração ou modificações de políticas públicas capazes de mitigar estes problemas ambientais, promovendo a melhoria do bem-estar da sociedade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a poluição do ar e o conforto térmico em trecho urbano na cidade de Fortaleza, Ceará, nos anos de 2021 e 2022, sob influência de um contexto pandêmico mundial.

2.2 Objetivos Específicos

- Monitorar poluentes atmosféricos representados pelas partículas totais em suspensão (PTS), particulado inalável (MP₁₀) e inalável fino (MP_{2,5}); O₃, CO₂ e compostos orgânicos voláteis totais (COVT) no trecho urbano em estudo.
- Avaliar se os poluentes mensurados estão dentro dos limites definidos nos padrões de qualidade do ar recomendados pelas legislações vigentes.
- Determinar os índices de qualidade do ar (IQAr) para os poluentes atmosféricos em estudo.
- Investigar o conforto térmico a partir das variáveis meteorológicas locais de velocidade dos ventos, temperatura e umidade relativa do ar.
- Avaliar o conforto térmico por termografia dos diferentes elementos construtivos presentes na área em estudo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Poluição do Ar

A poluição do ar consiste na presença ou lançamento de poluentes advindos de atividades antropogênicas e de fontes naturais na atmosfera que possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde e ao bem-estar dos seres vivos, além de ser prejudicial ao meio ambiente (IAP, 2012; OKE *et al.*, 2017).

Em termos gerais os poluentes atmosféricos podem ser classificados como primários, que correspondem aqueles que provêm diretamente das fontes emissoras ou secundários que são formados por meio de reações químicas entre os poluentes precursores e componentes naturais da própria atmosfera, como O_2 e H_2O (DERISIO, 2007; WHO, 2005).

De acordo com Oke *et al.* (2017) os principais poluentes atmosféricos encontrados no meio urbano são: CO_2 , CO, halocarbonos, CH_4 , NO, NO_2 , N_2O , compostos orgânicos voláteis, O_3 , MP_{10} , $MP_{2,5}$, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), SO_2 e Pb. Em relação a sua origem os poluentes podem ser provenientes de fontes estacionárias, móveis ou naturais ou proveniente de reações químicas que ocorrem na atmosfera, conforme listado no Quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de fontes de emissão de poluentes atmosféricos.

Fontes		Poluentes
Estacionárias	Combustão	Material particulado, SO_2 , SO_3 , CO, hidrocarbonetos e NO_x
	Industrial	Material particulado (fumos, poeira e névoas), SO_2 , SO_3 , HCl, hidrocarbonetos, mercaptanas, H_2S , HF, NO_x
	Queima de resíduo sólido	Material particulado, SO_2 , SO_3 , HCl, NO_x
Móveis	Origem veicular (caminhões, aviões, barcos, locomotivas etc.)	Material particulado, CO, NO_x , SO_2 , hidrocarbonetos, aldeídos, ácidos orgânicos
Naturais	Erupções vulcânicas, incêndios, maresia, esporos de fungos, ação de bactérias etc.	Material particulado, SO_2 , H_2S , CO, NO, NO_2 , hidrocarbonetos
Reações químicas na atmosfera		O_3 , aldeídos, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos e aerossóis fotoquímicos

Fonte: Adaptado de Derisio (2007).

O controle das emissões de poluentes no ar nas fontes de origem vem a mitigar os impactos negativos sob a sociedade e o meio ambiente. Assim, medidas como a aplicação de motores automotivos mais eficientes, utilização de veículos elétricos, combustíveis menos poluentes e o emprego de sistemas de filtragem em chaminés vem a reduzir os níveis de poluição do ar principalmente no meio urbano.

3.2 Monitoramento da Qualidade do Ar

3.2.1 Principais poluentes

A revolução industrial foi um marco do desenvolvimento humano tendo proporcionado avanços tecnológicos e grandes transformações tanto no campo econômico, social e ambiental, porém o progresso acelerado também ocasionou consequências como o aquecimento global e a poluição atmosférica.

A indústria chinesa do aço exemplifica a relação entre o crescimento industrial/econômico e a poluição do ar, pois a utilização maciça de carvão mineral em seus processos produtivos, causa a emissão de diversos poluentes como o CO₂, SO₂, NO_x e particulados na atmosfera (MELE; MAGAZZINO, 2020).

Iniciativas como a substituição do carvão por outras fontes energéticas menos poluidoras tendem a reduzir a emissão de poluentes. Yu *et al.* (2021) em sua pesquisa avaliaram uma política de substituição do carvão por gás natural, sendo possível observar reduções de MP_{2,5}, fumaça e SO₂ na ordem de 7%, 36% e 31,3%, respectivamente.

A poluição do atmosférica não pode ser um entrave no progresso mundial, porém, faz necessário o monitoramento da qualidade do ar em centros urbanos e áreas industriais para a geração de informações que possam fundamentar tomadas de decisões com foco em minimizar possíveis impactos ambientais desta natureza.

Os principais poluentes listados para fins de monitoramento da qualidade do ar pela legislação brasileira e recomendados pela OMS correspondem ao material particulado (PTS, MP₁₀ e MP_{2,5}), SO₂, NO₂, O₃, CO e Pb (BRASIL, 2018; WHO, 2021).

Esses poluentes formam um grupo que desempenha a função de indicadores de qualidade do ar, devido aos seus efeitos adversos provocados à sociedade e ao meio ambiente, além da sua maior frequência de ocorrência no meio urbano e industrial (DERISIO, 2007).

Os materiais particulados são formados por partículas sólidas ou líquidas suspensas na atmosfera dispostos como poeira, neblina, névoa, aerossol, fuligem e fumaça, podendo ser classificados conforme o diâmetro aerodinâmico de 50 μm , 10 μm e 2,5 μm como PTS, MP₁₀ e MP_{2,5}, respectivamente (BRASIL, 2018; VESILIND; MORGAN, 2011; WHO, 2005).

Ademais, vale ressaltar que o tamanho e o peso do material particulado estão relacionados ao seu tempo de permanência no ar, ou seja, partículas maiores tendem a manter-se na atmosfera por um período inferior que os de menores diâmetros (YNOUE *et al.*, 2017).

O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás inorgânico, incolor, com forte odor agudo, solúvel em regiões úmidas do sistema respiratório o que causa irritação em tais áreas, está diretamente relacionado com a formação de chuva ácida e é precursor dos sulfatos que além de contribuir na formação de MP₁₀ secundário, pode acidificar corpos d'água e interferir na visibilidade ambiental (CETESB, 2021a; DERISIO, 2012).

O dióxido de nitrogênio (NO₂) é um gás de cor marrom avermelhada com um odor agudo, sendo um forte oxidante que pode reagir com a água e produzir ácido nítrico e óxido nítrico, além de causar mudança de cor na atmosfera para tons de amarelo, ocasionado redução na visibilidade ambiental. O NO₂ é precursor na formação de outros poluentes como o O₃ troposférico (WHO, 2005; BAIRD, 2002).

O ozônio (O₃) é um gás oxidante e muito reativo que causa irritação em tecidos pulmonares, sendo este um poluente secundário formado na troposfera através de reações fotoquímicas com a atmosfera, principalmente em ambiente urbano a partir de compostos orgânicos voláteis (COV) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Vale salientar que 97% do O₃ se encontra na estratosfera com o importante objetivo de filtrar a radiação ultravioleta nociva proveniente do sol (ENGER; SMITH, 2006; SANCHEZ; PORTA, 2018; OKE *et al.*, 2017).

O monóxido de carbono (CO) é um poluente primário inodoro e incolor formado a partir de um processo não ideal de combustão limitada de oxigênio (queima incompleta). Em centros urbanos este gás é proveniente em sua maioria de veículos automotores, entretanto, fornos, fogões e aquecedores a gás também emitem CO comprometendo a qualidade do ar em ambientes internos (BAIRD, 2002; OKE *et al.*, 2017).

O chumbo (Pb) é um elemento tóxico que no passado foi muito utilizado como aditivo na gasolina, sendo que no Brasil o Pb foi substituído pelo etanol. Ademais, tem-se que atividades de processamento de minério, fábricas de baterias de chumbo-ácido e fundições são as atividades que mais contribuem para a emissão de Pb na atmosfera (ENGER; SMITH, 2006; OKE *et al.*, 2017).

Apesar do dióxido de carbono (CO₂) e dos compostos orgânicos voláteis (COV) não serem poluentes alvos de monitoramento pela legislação brasileira em ambiente externo, estes poluentes exercem efeitos nas mudanças climáticas e contribuem na formação de poluentes secundários.

O CO₂ é um gás de efeito estufa, incolor e inodoro proveniente do processo de combustão completa e da respiração humana, que apesar desse gás não ser tóxico pode ser perigoso em altas concentrações por causar asfixia, por exemplo, a um nível de 200.000 ppm há o fechamento parcial ou total da glote (VESILIND; MORGAN, 2011; GOYAL; KHARE, 2010).

Os COV são gases e vapores, com exceção do metano, proveniente de emissões biogênicas, combustão incompleta, evaporação de combustíveis e produtos derivados da indústria química e petroquímica, sendo que muitos deles são tóxicos e perigosos à saúde humana, além de percussores na formação de poluentes secundários como o O₃ (CETESB, 2021b; ENGER; SMITH, 2006).

A legislação europeia referência os seguintes COV percussores de O₃ para medição: etano, trans-2-butenos, n-hexano, o e (m+p)-xilenos, etileno, cis-2-butenos, i-hexano, acetileno, 1,3-butadieno, n-heptano, 1,2,4-trimetilbenzeno, propano, n-pentano, n-octano, i-pentano, i-octano, 1,3,5-trimetilbenzeno, n-butano, propeno, 1-penteno, benzeno, 1,2,3-trimetilbenzeno, formaldeído, i-butano, 2-penteno, tolueno, 1-butenos, isopreno, etilbenzeno (EC, 2008).

3.2.2 Técnicas de amostragem e redes de monitoramento

A avaliação da qualidade do ar depende da utilização de equipamentos capazes de mensurar as concentrações de poluentes na atmosfera, assim, o mercado conta com uma ampla variedade tecnológica visando atender as necessidades desse segmento.

Segundo Lacava (2002), para fins de monitoramento da qualidade do ar pode-se optar por amostradores passivos, monitores manuais (ativos), automáticos e sensores remotos ou a combinação destes, como descritos a seguir:

a) amostradores passivos: formados por discos ou tubos amostradores que operam por meio de difusão molecular do gás, absorvendo ou adsorvendo poluentes específicos em um determinado substrato químico. As vantagens estão relacionadas a facilidade de operação, baixo custo, não necessita de energia elétrica para o funcionamento. Com relação as desvantagens podem-se observar resultados não imediatos, limitações associadas a obtenção de medições (apenas médias mensal ou semanal), requerem análises laboratoriais posteriores.

b) monitores manuais (ativos): apresentam princípio de funcionamento baseado na sucção de uma determinada quantidade de ar através de um dispositivo de bombeamento que atravessa um meio coletor de caráter químico ou físico por um período usual de 24 horas. Assim, a coleta pode ser efetuada por adsorção, absorção, impactação, filtração, difusão e reação, com possibilidade de combinações entre os diferentes processos. As análises para determinar as concentrações são realizadas posteriormente em laboratório. As vantagens no uso de monitores manuais incluem baixo custo, fácil operação e dados confiáveis, as desvantagens correspondem a coleta das amostras e análise laboratorial, sendo que há limitações na determinação das concentrações sendo estas diárias e não horárias.

c) monitores automáticos (contínuos): são equipamentos apoiados em princípios eletro-ópticos, sendo que o ar a ser amostrado passa por uma câmara de reação que permite a leitura direta da propriedade óptica do gás ou a partir da ocorrência de uma reação química que produz fluorescência ou quimiluminescência. Assim, o equipamento possui um detector de luz que emite sinais elétricos indicando as concentrações dos poluentes presentes na amostra de ar coletado. As vantagens estão associadas a ampla variedade de poluentes que podem ser medidos, alta eficiência, medição contínua, disponibilidade de dados on-line e geração de dados horários. No caso das desvantagens estas estão atreladas ao alto investimento na aquisição e o custo de manutenção dos equipamentos, além de necessitar de equipe capacitada para operar a estação de monitoramento.

d) sensores remotos: fazem uso de métodos de espectroscopia ou laser para mensurar concentrações de poluentes próximo as fontes de emissão e quando se pretende avaliar os níveis de poluição em posição vertical. As vantagens observadas para tais sensores são a integração de medições em campo horizontal e vertical, aplicável para medir diversos poluentes com alta resolução, porém, as desvantagens estão relacionadas a dificuldades com a calibração e possíveis distorções nas medições causadas pelas condições atmosféricas.

No contexto da aplicação de métodos de medição utilizados em redes manuais e automáticas de monitoramento de qualidade do ar, o estado de São Paulo se destaca. Segundo Vormittag *et al.* (2021), São Paulo é uma das unidades federativas brasileira com maior quantidade de estações de monitoramento da qualidade do ar no país, sendo todas de natureza pública. De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) o monitoramento da poluição atmosférica em âmbito estadual é realizado por dois tipos rede de amostragem/medição: automática (61 estações fixas e duas estações móveis) e manual (22 locais de amostragem), entretanto, é possível verificar para a medição de SO₂ que há uma opção

pelo órgão supracitado de usar amostradores passivos para este poluente (CETESB, 2021b). Os tipos de redes e os parâmetros mensurados e métodos utilizados estão listados no Quadro 2.

Quadro 2 – Tipos de rede de monitoramento da qualidade do ar.

Tipo de rede monitoramento	Parâmetro	Método
Rede automática	partículas inaláveis finas - MP _{2,5}	radiação Beta
	partículas inaláveis - MP ₁₀	radiação Beta
	dióxido de enxofre	fluorescência de pulso (ultravioleta)
	óxidos de nitrogênio	quimiluminescência
	monóxido de carbono	infravermelho não dispersivo (GFC)
	ozônio	ultravioleta
	benzeno/tolueno	cromatografia gasosa/detecção por fotoionização (PID)
	enxofre reduzido total	oxidação térmica - fluorescência de pulso (ultravioleta)
Rede manual	partículas inaláveis finas - MP _{2,5}	gravimétrico/impactação virtual (dicotômico)
		gravimétrico/impactação e ciclone
	partículas inaláveis - MP ₁₀	gravimétrico/amostrador de grandes volumes acoplado a um separador inercial
		gravimétrico/impactação
	partículas totais em suspensão - PTS	gravimétrico/amostrador de grandes volumes
	fumaça	refletância
	dióxido de enxofre	cromatografia iônica/amostrador passivo
	acetaldeído/formaldeído	cromatografia líquida de alto desempenho/detecção UV-Visível
	benzeno/tolueno	cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas

Fonte: CETESB (2021b).

De acordo com Maatoug *et al.* (2012) e Lacava (2002), o biomonitoramento destaca-se como método complementar em relação as técnicas tradicionais de monitoramento da poluição atmosférica, sendo que este método implica no uso de organismos vegetais sensíveis que possam armazenar contaminantes em sua superfície e nos seus tecidos, funcionando dessa forma como um amostrador natural. Ademais, o material coletado é

analisado em laboratório, observando os efeitos relacionados ao metabolismo e informação genética, além da aparência visual da planta para avaliar a situação da poluição do ar no ambiente em estudo.

Outro aspecto importante a ser contemplado em estudos de monitoramento da qualidade do ar são os fatores meteorológicos, os quais estão relacionados ao transporte e dispersão de poluentes (DERISIO, 2012).

As variáveis meteorológicas mais relevantes são os ventos que atuam no transporte de poluentes e que em conjunto com o gradiente de temperatura e a precipitação exercem influência na estabilidade da atmosfera, ou seja, na capacidade de movimento ascendente e descendente das camadas de ar. Assim, uma atmosfera instável podem promover mudanças verticais em volumes de ar, fazendo com que a dispersão de poluentes não fique restrita somente a movimentos horizontais. Ademais, a radiação solar contribui na formação de poluentes secundários como o ozônio e a precipitação na deposição úmida de poluentes (YNOUE *et al.*, 2017; DERISIO, 2012).

No contexto da influência das variáveis meteorológicas, em um estudo realizado na cidade de Pequim, Zhang (2019) mostrou que a velocidade extrema do vento foi o fator de maior influência na variação no índice de qualidade do ar (IQA_r) na capital chinesa. No entanto, a umidade relativa do ar exerceu pouca interferência no IQA_r e variáveis como a pressão atmosférica e a temperatura do ar não determinaram mudanças nos níveis de poluição do ar em Pequim, China.

3.3 Padrões de Qualidade do Ar

A utilização de padrões de qualidade do ar vem a traçar diretrizes com o intuito de direcionar políticas públicas que promovam a prevenção e o controle da poluição do ar a partir de concentrações limites para diversos poluentes estabelecidos por diferentes países.

No Brasil a primeira legislação mais efetiva relacionada ao tema supracitado foi a Portaria do Ministério do Interior Nº 231, de 27 de abril de 1976, que surgiu após um evento histórico o “milagre econômico brasileiro”, ocorrido em 1969 a 1973. Esta legislação, abordou os valores limites para o material particulado, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e oxidantes fotoquímicos.

Em nível federal a legislação vigente é a Resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018, sendo elaborada sob orientação de documento técnico que apresenta as

diretrizes, critérios de implementação e as concentrações limites de diferentes poluentes da Organização Mundial de Saúde (OMS) de 2005.

O Quadro 3, apresenta os padrões de qualidade do ar, adotados pelo governo brasileiro, vale salientar que tais valores estão sujeitos a atualizações.

Quadro 3 – Padrões de qualidade do ar vigentes no Brasil.

Poluente atmosférico	Período de referência	PI-1 ^a	PI-2 ^b	PI-3 ^b	PF ^c	ppm
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	
Material Particulado - (MP ₁₀)	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Material Particulado - (MP _{2,5})	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - (SO ₂)	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - (NO ₂)	1 hora	260	240	220	200	-
	Anual	60	50	45	40	-
Ozônio - (O ₃)	8 horas	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - (CO)	8 horas	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - (PTS)	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual	-	-	-	80	-
Chumbo - (Pb)	Anual	-	-	-	0,5	-

^a padrão de qualidade do ar intermediário primeira etapa que entra em vigor a partir da publicação desta Resolução.

^b padrão de qualidade do ar intermediário segunda e terceira etapa.

^c padrão de qualidade do ar final valores guia definidos pela OMS em 2005.

Os PI-2, PI-3 e PF serão implementados de forma subsequente, considerando os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliação da Qualidade do Ar, elaborados pelos órgãos estaduais e distrital de meio ambiente. Fonte: Adaptado de CONAMA 491/18 (BRASIL, 2018).

Em nível estadual, São Paulo dispõe de padrões de qualidade do ar com o intuito amenizar os níveis de poluição atmosférica de forma gradativa em seu território, por meio da publicação do Decreto Estadual Nº 59.113 de 23/04/2013. Vale destacar que as mudanças entre a legislação federal e estadual vigentes são mínimas, sendo que o Decreto Estadual paulista usa apenas a média aritmética e geométrica anual nos tempos de amostragem. Em contrapartida, observa-se que a CONAMA 491/18 e o Decreto Estadual Nº 59.113 de 2013 estabelecem que os poluentes como Fumaça e PTS são parâmetros auxiliares que podem ser usados segundo o critério do órgão ambiental responsável.

Em âmbito internacional, vários países adotam suas próprias legislações referente aos padrões de qualidade do ar, sendo fundamental a própria definição dos limites nas concentrações de poluentes, pois há países ou regiões que sofrem maior deterioração da

qualidade do ar. Os padrões de qualidade do ar dos Estados Unidos da América (EUA) estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Padrões de qualidade do ar em vigor nos Estados Unidos.

Poluente		Tipo de padrão	Tempo médio de amostragem	Concentração
Monóxido de carbono (CO)		primário	8 horas	9 ppm
			1 hora	35 ppm
Chumbo (Pb)		primário e secundário	Média móvel de 3 meses	0,15 µg/m ³
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)		primário	1 hora	100 ppb
		primário e secundário	1 ano	53 ppb
Ozônio (O ₃)		primário e secundário	8 horas	0,070 ppm
Particulados	MP _{2,5}	primário	1 ano	12 µg/m ³
		secundário	1 ano	15 µg/m ³
		primário e secundário	24 horas	35 µg/m ³
	MP ₁₀	primário e secundário	24 horas	150 µg/m ³
Dióxido de enxofre (SO ₂)		primário	1 hora	75 ppb
		secundário	3 horas	0,5 ppm

Fonte: adaptado de EPA (2015).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) utiliza a terminologia padrões primários para expressar a proteção à saúde pública e de grupos da sociedade mais vulneráveis (crianças, idosos e com doenças respiratórias), enquanto os padrões secundários correspondem a proteção do bem-estar público, podendo englobar prejuízos a fauna, flora, construções civis e redução da visibilidade.

Os padrões americanos de qualidade do ar apresentam diferenças em relação à brasileira, por exemplo, pode-se citar um maior rigor em relação a concentração de chumbo pelos Estados Unidos, entretanto, observar-se que no caso da concentração dos particulados os limites são maiores comparados aos valores brasileiros.

A União Europeia (EU) também estabelece um padrão de qualidade do ar para todos os países membros que compõe o bloco, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Padrão europeu de qualidade do ar em vigência.

Poluente	Concentração	Período médio	Ultrapassagens permitidas por ano
Material Particulado (MP _{2,5})	25 µg/m ³	1 ano	-
Dióxido de enxofre (SO ₂)	350 µg/m ³	1 hora	24 vezes
	125 µg/m ³	24 horas	3 dias
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	200 µg/m ³	1 hora	18 vezes
	40 µg/m ³	1 ano	-
Material Particulado (MP ₁₀)	50 µg/m ³	24 horas	35 dias
	40 µg/m ³	1 ano	-
Chumbo (Pb)	0,5 µg/m ³	1 ano	-
Monóxido de carbono (CO)	10 mg/m ³	8 horas	-
Benzeno	5 µg/m ³	1 ano	-
Ozônio	120 µg/m ³	8 horas	25 dias em média ao longo de 3 anos
Arsênio (As)	6 ng/m ³	1 ano	-
Cádmio (Cd)	5 ng/m ³	1 ano	-
Níquel (Ni)	20 ng/m ³	1 ano	-
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA)	1 ng/m ³	1 ano	-

Fonte: Adaptado da Diretiva 2008/50/EU (EC, 2008).

A legislação europeia é a mais abrangente, tendo em vista que aborda poluentes como o benzeno, arsênico, cádmio, níquel e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, definindo suas concentrações limites, conforme visto no Quadro 5. Assim, é possível perceber que a União Europeia vem apresentando avanços em sua política de poluição atmosférica. Entretanto, tende a ser mais flexível que a legislação brasileira em relação ao MP₁₀ para período anual, para o SO₂ e O₃. Além disso poluentes como fumaça e PTS não estão presentes na sua concepção.

Com relação ao MP_{2,5} tem-se que a Diretiva 2008/50/UE acrescenta novos valores que são definidos em âmbito nacional, por meio do Indicador de Exposição Média (IEM). Assim, a concentração média anual do MP_{2,5} por 3 anos seguidos é apurado através de estações de monitoramento localizadas em centros urbanos que promovam aglomeração de pessoas.

O Quadro 6 apresenta as novas concentrações de particulado de diâmetro inferior a 2,5 µm segundo a união europeia.

Quadro 6 – Valores adicionais para MP_{2,5} conforme o indicador de exposição média (IEM).

Título	Métrica	Período médio	Tolerância aceita a cada ano
MP _{2,5} : Obrigação de concentração de exposição	20 µg/m ³ (IEM)	Com base na média de 3 anos	-
Alvo de redução de exposição para MP _{2,5}	Redução percentual + todas as medidas necessárias a chegar a 18 µg/m ³ (IEM)	Com base na média de 3 anos	-

Fonte: Adaptado da Diretiva 2008/50/EU (EC, 2008).

Por fim, a OMS disponibiliza um guia com o objetivo de orientar a nível mundial os diversos países sobre as questões relacionadas a poluição do ar, sugerindo valores limites para as concentrações de material particulado (MP_{2,5} e MP₁₀), O₃, NO₂, SO₂ e CO. Vale salientar que houve atualizações referentes as concentrações limites sugeridas pela OMS no ano de 2005 e pelas novas diretrizes publicadas em 2021, conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 – Comparativo entre os valores limites sugeridos pela OMS em 2005 e 2021.

Poluente	Período	2005	2021
MP _{2,5} (µg/m ³)	Anual	10	5
	24 horas ^a	25	15
MP ₁₀ (µg/m ³)	Anual	20	15
	24 horas ^a	50	45
O ₃ (µg/m ³)	6 meses ^b	-	60
	8 horas ^c	100	100
NO ₂ (µg/m ³)	Anual	40	10
	24 horas ^a	-	25
SO ₂ (µg/m ³)	24 horas ^a	20	40
CO (mg/m ³)	24 horas ^a	-	4

^a 3 a 4 dias de excedência por ano. ^b média da concentração média diária máxima de 8 horas de O₃ nos seis meses consecutivos com a maior concentração média de O₃ em seis meses. ^c 3 a 4 dias de excedência por ano.

Fonte: Adaptado de WHO (2021).

Os valores comparativos presentes no Quadro 7 mostraram que a OMS reduziu os valores limites para os particulados e dióxido de nitrogênio e compôs novos períodos de medições para o O₃ e NO₂, contudo, a nova concentração limite para o dióxido de enxofre foi dobrada em relação a recomendação de 2005. Ademais, mantém-se válidos os valores limites para tempos médios de curta duração para os poluentes: dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono, conforme o Quadro 8.

Quadro 8 – Concentrações para tempos médios curtos de NO₂, SO₂ e CO.

Poluente	Período	Valores limites
NO ₂ (µg/m ³)	1 hora	200
SO ₂ (µg/m ³)	10 minutos	500
CO (mg/m ³)	8 horas	10
	1 hora	35
	15 minutos	100

Fonte: Adaptado de WHO (2021).

Os padrões de qualidade do ar recomendados pela OMS têm uma atuação fundamental nos interesses ambientais e de saúde pública mundial, incentivando o desenvolvimento de tecnologias menos poluentes e políticas públicas que promovam o desenvolvimento sustentável.

Pesquisas envolvendo o monitoramento de diversos poluentes urbanos realizados em diferentes países possibilitam a obtenção informações relevantes e compartilhamento de experiências que podem subsidiar projetos com o intuito de melhorar a qualidade do ar.

Neste contexto, Talbi *et al.* (2018) monitoraram a qualidade do ar em um centro urbano de Argel, Argélia, obtendo concentrações médias anuais para o MP₁₀ e MP_{2,5} de 60, µg/m³ e 32,2 µg/m³, havendo uma forte correlação entre os particulados em análise. Os autores também verificaram a presença de elementos como Fe, Ba, Mn, Ca e Cu nos particulados, porém, o chumbo (0,58 µg/m³) excedia o limite de 0,5 µg/m³, estabelecido pela OMS.

Tischer *et al.* (2019) em estudos em Balneário Camboriú, Santa Catarina, relataram níveis de NO₂, SO₂ e CO acima do permitido pela CONAMA 491/2018, correspondentes a 60%, 71% e 41% nos cruzamentos em horários de maior fluxo veicular a uma distância de até 10 metros das rodovias. Os autores projetaram para o ano de 2040 que as áreas afetadas pelos poluentes citados acima terão um acréscimo de 20,2% (NO₂); 87,4% (SO₂) e 328,6% (CO) avaliando apenas o horário de pico. A pesquisa também revelou que o custo devido aos danos causados pelo lançamento de NO₂, SO₂, CO e particulados para 2040 está estimado na ordem de US\$ 1.381.283,53.

Ly *et al.* (2020) efetuaram um monitoramento em uma área urbana em Hanoi no Vietnã próximo a rodovias que possuíam fluxo predominante de veículos movidos a gasolina verificando níveis médios de COV Totais (COVT) de 305,1 ppb com uma mediana de 249,3 ppb. A maior quantidade de compostos orgânicos voláteis encontrados na pesquisa foram alcanos com uma participação de cerca de 62% dos COVT.

Pérez-Martínez, Andrade e Miranda (2017) apontaram que as restrições de tráfego de veículos pesados movidos a diesel em uma avenida paulista contribuíram para a melhoria na qualidade do ar. Os resultados mostraram que houve um decréscimo de 28% e 43% para o MP₁₀ e NO_x nos horários de pico. Os autores também relataram aumento nos níveis de O₃.

Gately *et al.* (2017) apresentaram em sua pesquisa que a elevação da velocidade de fluxo veicular como forma para cessar o congestionamento traz implicações na poluição do ar principalmente em rodovias individuais dentro de uma área urbana. A simulação realizada pelos autores mostrou que com o fim do engarrafamento no centro de Boston/EUA, proporcionaria reduções em torno de 20% a 75% das emissões, dependendo do poluente.

Segundo Wen *et al.* (2020a), os acréscimos nos níveis de CO, CO₂, NO_x e MP_{2,5} em período de engarrafamento matinal no distrito de Futian, China, são da ordem de 32,0%; 26,2%; 20,5% e 17,9%, respectivamente.

Bigazzi, Figliozzi e Clifton (2015) relataram que com o aumento do período de congestionamento há uma maior exposição ao CO e NO_x pelos motoristas. Segundo os autores o tempo de exposição é o principal responsável pela inalação destes poluentes em detrimento do aumento da concentração dos mesmos.

Breuer *et al.* (2021) conduziram uma pesquisa no estado da Renânia do Norte-Vestfália, Alemanha, e observaram que a utilização de caminhões elétricos a bateria e a célula de combustível podem reduzir entre 28% e 13,55% das emissões de CO₂.

Li, Lu e Wang (2020) verificaram que a utilização de combustível com melhor padrão de qualidade contribui com redução da poluição do ar em 12,9%; principalmente quanto aos níveis de material particulado e O₃.

Uma estimativa realizada por meio do modelo i-Tree Eco na França mostrou que as árvores da cidade de Estrasburgo foram capazes de retirar 88 toneladas de poluentes do ar no período de 2012 a 2013. Ademais, também foi observado uma redução na emissão de MP₁₀ de aproximadamente 7% devido a vegetação, entretanto, a diminuição não ocorre de maneira uniforme na cidade francesa (SELMi *et al.*, 2016).

Em um biomonitoramento realizado por Alexandrino *et al.* (2020) usando *Araucaria heterophylla*, em Quito no Equador foi verificado que as concentrações de metais como Ba, Zn, Cu, Cr, Pb e Co aumentaram quando o tráfego de veículos foi mais intenso, sendo que Ba, Zn e Cu são os elementos mais presentes independente da intensidade do tráfego. Os autores relatam que a presença de áreas verdes tem o poder de minimizar os níveis desses elementos no ar.

3.4 Qualidade do Ar e Saúde Humana

Estimativas realizadas pela OMS mostram que a degradação da qualidade do ar foi responsável por cerca de 4,2 milhões de mortes em escala global no ano de 2016, sendo que 82% dessas mortes são atribuídas a doenças não transmissíveis (WHO, 2018). Como resultado, perceber-se que a poluição do ar vem causando um impacto negativo relevante na expectativa de vida dos seres humanos.

Karimi e Shokrinezhad (2021) verificaram que um aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração de MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$ pode significar um acréscimo de 2,5% e 4,5%, respectivamente, nos óbitos decorrente por doenças respiratórias, sendo que idosos e mulheres são mais suscetíveis a tais poluentes.

Balakrishnan *et al.* (2019) em um estudo realizado em Delhi no ano de 2017 descreveram que a poluição do ar por material particulado foi associada a 11.732 óbitos, além de causar um decréscimo de 1,5 anos na expectativa de vida de seus habitantes.

Wang *et al.* (2019) estimaram que o $\text{MP}_{2,5}$ foi responsável por até 26.700 óbitos no estado da Califórnia/EUA no ano de 2012, enquanto a exposição ao O_3 de longa duração causou 13.700 mortes no mesmo período das quais 7.300 óbitos são de caráter respiratório.

Çapraz e Deniz (2021) associaram que o aumento nos níveis de NO_2 e $\text{MP}_{2,5}$ geram maior probabilidade de os habitantes de Istambul/Turquia serem hospitalizados, sendo que uma elevação de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ pode ocasionar um acréscimo de 8,06% na admissão hospitalar causado por bronquite aguda.

Zhang *et al.* (2021) em Shenzhen/China mostraram que a internação por doenças cardiovasculares relacionados ao aumento da poluição por MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$ cresceram em 3,45% e 4,5%, respectivamente, com o incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em suas concentrações.

Shen *et al.* (2017) relataram que o acréscimo de 1% na concentração de $\text{MP}_{2,5}$ favorecem a um aumento de 0,7% na procura por atendimento médico devido a causas respiratórias, entretanto, foi visto que as crianças estão sujeitas ao dobro de atendimentos em razão da exposição a tais particulados.

Requia *et al.* (2018) avaliaram o impacto financeiro da poluição do ar referente ao $\text{MP}_{2,5}$ em período mais intenso de congestionamento no tráfego da região metropolitana de Toronto e Hamilton no Canadá, sendo estimados gastos de 88 milhões de dólares no tratamento por doenças cardiovasculares ao ano.

Leirião e Miraglia (2019) observaram na região metropolitana de São Paulo que a poluição por particulados entre os anos de 2014 a 2015 refletiram em 609 mortes em pessoas abaixo de 5 anos para doenças respiratórias e 111.696 óbitos em pessoas acima de 30 anos referente a problemas cardiopulmonares. Os autores também enfatizam que a adequação da frota veicular as fases do PROCONVE, poderiam contribuir na redução de 3,2 bilhões de euros, devido a preservação de 65.568 anos de vida da população dessa área em estudo.

Segundo estimativa realizado por Andreão, Albuquerque e Kumar (2018) para a cidade de São Paulo entre os anos de 2000 e 2017, caso os níveis de $MP_{2,5}$ estivessem dentro do limite anual estabelecido pela OMS ($10 \mu g/m^3$), uma média de até 82.720 óbitos poderia ter sido evitada.

Apesar de ser um gás de efeito estufa o CO_2 não possui uma legislação nacional de qualidade do ar ou recomendação da OMS que estabeleça limites na sua concentração em ambientes externos. Entretanto, pesquisas desenvolvidas nos Estados Unidos e China por Apergis *et al.* (2018) e Cai *et al.* (2018b) sugerem que a redução no lançamento de CO_2 na atmosfera pode resultar em menores gastos em saúde pública.

3.5 Conforto Térmico Urbano

O conforto térmico compreende uma avaliação subjetiva advindo da própria mente humana que revela o grau de satisfação térmica em relação ao ambiente ao qual se está inserido (ASHRAE, 2020; GOEDERT, 2006). No entanto, é importante salientar que as condições térmicas ambientais exercem um papel fundamental dentro da sociedade, pois interferem diretamente na produtividade, satisfação e qualidade de vida da população.

O nível de conforto térmico depende das variáveis climáticas representadas pela temperatura do ar, umidade relativa, velocidade dos ventos e temperatura radiante média e variáveis humanas atreladas aos diversos tipos de vestimentas e ao metabolismo corporal (CARVALHO, 2018).

Vale ressaltar que a umidade do ar também tem importante atuação no conforto térmico em regiões tipicamente úmidas, pois o vapor d'água presente na atmosfera absorve radiação infravermelha durante o dia, servindo tanto de proteção para o solo e, no período noturno, como barreira térmica ao calor dissipado pela superfície terrestre. Ademais, regiões litorâneas estão mais propensas a ter menor variação térmica no decorrer do dia, pois os corpos d'águas marítimos servem como um fator regulador, retendo o calor absorvido durante o dia e

dissipando no decorrer da noite, fazendo com que no período noturno as temperaturas não caiam de forma acentuada (FROTA; SCHIFFER, 2003; DIAS; SILVA, 2009; YNOUE *et al.*, 2017).

Leite (2015) e Novaes (2020) relatam que os ventos atuam de forma a minimizar os efeitos térmicos no ambiente urbano, contribuindo com a transferência de calor entre o corpo humano e o ambiente. No entanto, vale salientar que dependendo da temperatura do ar o corpo pode ganhar ou perder calor. Em complementação, Muniz e Caracristi (2018) observaram a ação dos ventos envolvendo o campo térmico no centro da cidade de Sobral, Ceará, sendo que fatores como intensidade e constância dos ventos afetaram os níveis de conforto térmico. Os autores também verificaram que os ventos quentes e secos agiram de forma adversa, pois a alta temperatura do ar propiciou maiores sensações de desconforto térmico e a falta de umidade do ar promovem irritação nas mucosas das vias respiratórias.

Alterações no microclima urbano e consequentemente no campo térmico podem ser ocasionados por diversos fatores como a presença de áreas vegetadas, edificações de grande porte, diferentes tipos de materiais construtivos e a emissão de calor por equipamentos industriais e de transporte (FROTA; SCHIFFER, 2003; YNOUE *et al.*, 2017).

Segundo Ynoue (2017), as áreas vegetadas que favorecem o sombreamento e a evapotranspiração promovem a redução da temperatura do ar e maiores índices de umidade.

Ghaffarianhoseini *et al.* (2019) mostraram que locais sombreados por vegetação ou prédios dentro do *campus* da Universidade da Malaia na Malásia proporcionaram um ambiente termicamente confortável em 90% do tempo no intervalo das 10 h às 19 h. Também foi observado que em áreas sombreadas há uma redução da temperatura radiante média em até 32°C, podendo um local não-sombreado atingir até 71,13 °C.

Speak *et al.* (2021) descreveram que na cidade de Bolzano na Itália o sombreamento produzido pelas árvores afetou diretamente os níveis de conforto, sendo observada uma temperatura da testa (osso frontal) 1,5 °C mais elevada em local onde não havia árvores.

A verticalização urbana compromete a circulação de ar e promove a absorção de calor nos materiais que compõe suas estruturas, principalmente em climas úmidos, ocasionando em posterior dissipação de calor à noite para o ambiente externo e interno (FROTA; SCHIFFER, 2003).

Mendes *et al.* (2018) analisaram o conforto térmico em quatro bairros na capital pernambucana, verificando que os bairros com maiores temperaturas do ar possuíam edificações que dificultavam uma maior circulação do ar, além de pouca área vegetada, gerando um acréscimo de temperatura média entre 0,7 °C e 0,8 °C comparativamente ao bairro mais agradável termicamente para os meses em estudo.

De acordo com Carvalho (2018), vale destacar que condições como idade, sexo, altura, massa, etnia dentre outras também influenciam na percepção térmica humana, porém, não são aplicados em cálculos de índices de sensação térmica.

Os indicadores térmicos são importantes meios de mensurar a situação de conforto térmico humano em determinada localidade. Tais índices podem ser classificados, de acordo com Frota e Schiffer (2003, p. 26) como:

- a) índices biofísicos: que se baseiam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a esses elementos;
- b) índices fisiológicos: que se baseiam nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura seca do ar, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do ar;
- c) índices subjetivos: que se baseiam nas sensações subjetivas de conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto térmico variam.

A utilização de índices de conforto térmico está presente em diversos estudos como o objetivo de avaliar a interação entre as condições meteorológicas locais com os seres humanos e seus possíveis efeitos provocados pelo campo térmico urbano.

Santos *et al.* (2018) realizaram um estudo de conforto térmico em Santarém, Pará, na estação seca. Os valores do índice de calor (IC) mostraram que no intervalo de 11 h às 18 h a sensação térmica em ambiente aberto alertava para um nível de cautela extrema. Ademais, o índice de temperatura e umidade (ITU) e a temperatura efetiva em função do vento (TEv) apresentaram maior grau de desconforto no período entre 15 h e 16 h. Durante o estudo a temperatura do ar alcançou um valor máximo de 31,1 °C.

Marçal *et al.* (2019) efetuaram um estudo de conforto térmico em duas praças nas cidades paraibanas de Teixeira e Patos. O índice TEv mostrou um maior nível de desconforto no espaço público situado em Patos no mês de junho (período seco) no intervalo de 11 h às 15h, sendo o local classificado como muito desconfortável. Os autores, observaram que na praça em Teixeira no mesmo mês obteve classificação confortável. Em tempo, vale destacar que a intensidade de ventos em Teixeira foi maior que em Patos com diferença média de 1,94 m/s.

Nascimento *et al.* (2019) realizaram estudo abrangendo o campo térmico em algumas ruas e uma praça localizadas em Recife, Pernambuco. Os resultados mostraram que o índice de desconforto de Thom (IDT) resultou em um ambiente desconfortável para mais de 50% da população. Entretanto, vale salientar que no período de 9 h da manhã o valor máximo atingiu um IDT de 29,2 °C, provocando um estado de estresse severo para 100% da população e um IDT mínimo de 23,4 °C, representando menos da metade da população sob desconforto térmico.

O processo de urbanização promove alterações na superfície natural do solo e a incorporação de maiores áreas edificadas, acarretando em mudanças no balanço de energia o que também favorece a modificação climática local, resultando em maior desconforto térmico humano (LIMA, 2018; LEITE, 2015).

De acordo com Novaes (2020) a configuração urbana desempenha um papel fundamental nas condições ambientais de conforto, podendo influenciar parâmetros como radiação solar, iluminação e circulação de ar. Assim, o autor enfatiza que o uso de pavimento asfáltico e concreto nas grandes cidades incrementa o acúmulo de calor em tais materiais de forma propiciar um maior aquecimento no meio urbano.

O adensamento urbano favorece a ocorrência do fenômeno ilhas de calor, no qual a temperatura do ar no dossel urbano torna-se mais elevada que em áreas rurais próximas, podendo alcançar até 6 °C de diferencia térmica no ar entre tais áreas. Assim, tal fenômeno tende a ocorrer pela maior presença de materiais construtivos que absorvem e armazenam calor, além da poluição do ar, produção de calor antropogênico, redução da vegetação nativa e decréscimo da capacidade de ventilação urbana (GARTLAND, 2010; ROMERO *et al.*, 2019).

Ainda dentro do contexto urbano, os materiais desempenham um importante papel no conforto térmico, sendo que a opção por materiais com elevada emissividade e refletividade à radiação solar proporciona redução na intensidade das ilhas de calor (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011). Hong *et al.* (2022) propõe a utilização tintas claras e materiais com baixa inércia térmica como forma de reduzir a temperatura de superfície.

Martin *et al.* (2022) destaca que vários estudos no campo do ambiente construído utilizaram imagens térmicas por meio da termografia infravermelha para avaliar o desempenho térmico de edificações, ilhas de calor e fluxos de calor urbanos. Ademais, os autores perceberam um crescente interesse na exploração da termografia infravermelha em pesquisas relacionadas ao ambiente urbano.

A termografia por infravermelho consiste em uma técnica não destrutiva que se embasa em um fenômeno físico no qual todo material emite radiação, assim, permitindo o registro da temperatura superficial de um determinado corpo por meio de imagens térmicas (BIAGIOTTI, 2021; BERNARDINO, 2018).

Segundo Ferreira (2019) na medição de temperatura de superfície pode-se utilizar sensores termais portáteis ou embarcados em satélites ou aeronaves. Assim, câmaras termográficas fornecem melhores resoluções de imagens, no entanto, possuem menor capacidade na captação dimensional da área de superfície.

Do ponto de vista estrutural a superfície terrestre urbana é composta por materiais como concreto e pavimento asfáltico com diferentes capacidades caloríficas que contribuem nas alterações do conforto térmico local, porém, a presença de vegetação favorece na atenuação dos níveis de temperatura de superfície.

Mehrotra *et al.* (2021) observaram em Mumbai na Índia a temperatura de superfície em diferentes locais em três horários distintos durante a tarde e à noite. Os resultados mostraram que a maior temperatura mensurada foi de 42 °C no concreto, entretanto, a temperatura do ar não sofreu mudanças muito significativas. Ademais, os autores perceberam que o sombreamento por meio de árvores favoreceu a redução da temperatura de superfície e do ar, elevando o conforto térmico do local.

Muniz-Gäal *et al.* (2018) realizaram uma análise de térmica em materiais de cobertura e observaram-se que as temperaturas de superfície das telhas cerâmica esmaltadas amarelas e esmaltadas grafites mostraram valores térmicos entre 57,1 °C e 96,9 °C. Em termos, telhas com cores mais claras apresentaram maior eficiência em relação a refletância solar.

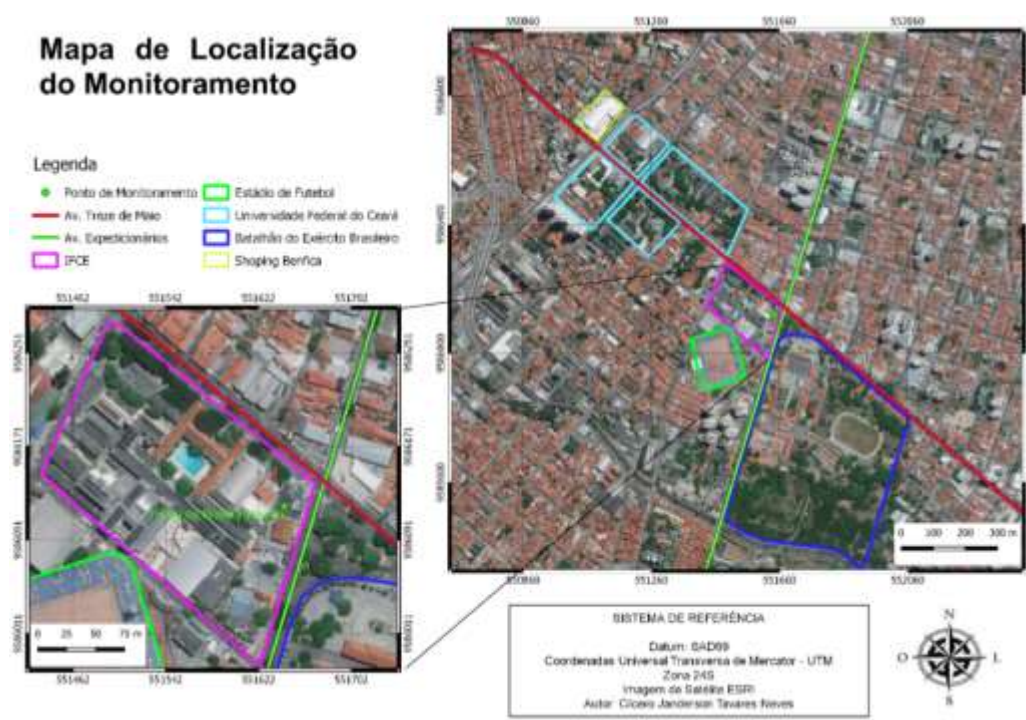
Neves *et al.* (2019) verificaram na quadra chuvosa as temperaturas superficiais dos materiais presentes em uma praça localizada em Fortaleza, Ceará, com variações térmicas alcançando até 11,9 °C para os diferentes elementos no período da tarde do mesmo dia. Os autores observaram que a variação de temperatura superficial pela manhã foi menor que nos períodos da tarde e fim da tarde, sendo que o asfalto e concreto apresentaram níveis térmicos mais elevados de 50,2 °C e 47,8 °C, respectivamente. Ademais, a madeira obteve melhor desempenho térmico, atingindo valor máximo de 38,3 °C e mínimo de 32,9 °C.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da Área da Pesquisa

O monitoramento da qualidade do ar foi realizado na área da estação de estudos de poluição atmosférica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará *Campus* de Fortaleza situada a uma distância de aproximadamente 35 m do cruzamento entre as avenidas “Treze de Maio” e “Dos Expedicionários” na cidade de Fortaleza, Ceará, sob coordenadas 3° 44' 41" S (latitude) e 38° 32' 07" W (longitude), conforme a Figura 1. Este mesmo sítio já foi utilizado em estudos de qualidade do ar nos anos de 2013 e 2014.

Figura 1 – Localização da área de monitoramento no trecho urbano em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.



Fonte: Autor (2022).

A região no entorno, onde o experimento foi alocado abrange diversos tipos de construções que promovem grande movimentação de pessoas e veículos, como: farmácias, praças, estádio de futebol, escolas, universidades e estabelecimentos comerciais. A Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC) da Cidade de Fortaleza no ano de 2022 relata que a Avenida 13 de Maio é a sétima avenida mais movimentada da cidade de Fortaleza, com média diária de 43.950 veículos motorizados (PORTAL G1, 2022).

4.2 Monitoramento dos Parâmetros Meteorológicos

As variáveis meteorológicas correspondentes a temperatura e umidade relativa do ar, pluviosidade, direção e intensidade dos ventos foram registradas de forma contínua durante todo o período das amostragens, abrangendo intervalos de 30 min. As variáveis meteorológicas foram mensuradas por meio de uma estação meteorológica *Davis Vantage Vue Wireless K6250* alocada em cima de um tripé a uma altura de 2 m, conforme a Figura 2. Os dados coletados foram utilizados tanto para as análises de poluição atmosférica como para os cálculos do nível de conforto térmico nas dependências do IFCE *Campus Fortaleza*.

Figura 2 – Estação meteorológica usada nos estudos de monitoramento.



Fonte: Autor (2022).

4.3 Monitoramento dos Poluentes Atmosféricos

O monitoramento da poluição atmosférica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) foi realizado em um ponto fixo, obedecendo os preceitos da resolução CONAMA N° 491/2018. Os particulados: PTS, MP₁₀ e MP_{2,5} foram medidos em períodos de 24 h e O₃ em 8 h. Para as medições dos compostos orgânicos voláteis totais (COVT) e CO₂ adotou-se o mesmo intervalo de tempo da coleta dos particulados, com registros a cada 30 minutos, pois não há normatização para ambientes externos sobre tais poluentes.

O processo de amostragem compreendeu 31 campanhas, abrangendo os períodos climáticos: seco, de 22/09/2021 a 27/12/2021 e chuvoso, de 02/01/2022 a 21/03/2022.

A frequência amostral adotada foi de uma campanha ocorrendo a cada 6 dias, compreendendo desse modo, todos os dias da semana (LIMA, 2017; BRASIL, 2019). As campanhas tinham início às 08:00 h e finalizavam às 08:00 h do dia seguinte para as medições de 24 h.

No caso da amostragem de O_3 o intervalo adotado foi das 9:00 h às 17:00 h do mesmo dia, sendo aplicada uma programação de coleta de dados a cada 1 hora.

Os equipamentos utilizados para a coleta dos materiais particulados: PTS, MP_{10} e $MP_{2,5}$ foram Amostradores de Grande Volume (AGV) Hivol HVS 3000® da Ecotech, conforme apresentado na Figura 3. Os amostradores foram devidamente calibrados antes do início das medições.

Figura 3 – Amostradores Hivol HVS 3000® para coleta dos particulados: PTS, MP_{10} e $MP_{2,5}$.



Fonte: Autor (2021).

O princípio de funcionamento dos equipamentos HiVol envolve a sucção do ar exterior sob vazão controlada, o qual adentra aos *inlets* que executam a separação das partículas de acordo com o seu diâmetro aerodinâmico ($10\ \mu\text{m}$ e $2,5\ \mu\text{m}$). Em seguida, o ar passa por um filtro de fibra de vidro da marca *Sartorius Stedim Biotech*, onde as partículas ficam retidas, o qual possui dimensão de 203 mm de largura e 254 mm de comprimento e $52\ \text{g/m}^2$ de gramatura. Por fim, o ar filtrado é aproveitado no resfriamento do motor e posteriormente retorna ao ambiente. A vazão de captação de ar utilizada nos amostradores foi de $68 \pm 3\ \text{m}^3/\text{h}$, a qual foi mantida contínua durante todo o experimento.

Vale ressaltar que para a disposição dos amostradores no local de pesquisa foi empregado o protocolo da EPA, cujos equipamentos devem se situar a uma distância mínima de 2 m entre cada um deles, porém, não foi ultrapassado o máximo de 4 m (EPA, 1999). Assim, não incorrendo em distorções nas medições pode-se realizar análises comparativas, pois não há grandes distâncias que promovam coletas de ar pertencentes a diferentes ambientes.

Os níveis de ozônio foram detectados a partir do monitor de ozônio Modelo 202 da 2B Technologies, o qual detém uma célula de absorção de luz UV a 254 nm que permite medições dentro do intervalo de 1,5 ppb a 250 ppm de O₃ (Figura 4). Para a coleta um tubo de plástico conectado a saída do monitor foi disposto a uma altura de 1,5 m do solo.

Figura 4 – Monitor de ozônio usados no monitoramento atmosférico na área em estudo.



Fonte: Autor (2022).

Para as medições de CO₂ e COVT foi usado um registrador de dados HOBO U12-013 *data logger* com dois canais externos para sensores TEL-7001 de CO₂ (0-2500 ppm) e T-ION-TVOC de compostos orgânicos voláteis totais (0-10 ppm), conforme a Figura 5. O equipamento foi fixado a 1,5 m de altura em uma haste de metal sustentada por um tripé.

Figura 5 – Sensor HOBO data logger equipado com 2 canais externos (CO₂ e COVT).



Fonte: Autor (2022).

As concentrações dos particulados PTS, MP₁₀ e MP_{2,5} foram obtidas através de análises gravimétricas de acordo com os procedimentos apresentados pelas NBR 13412/1995 e NBR 9547/1997 (ABNT, 1995, 1997).

Para cada amostragem os filtros passaram por um processo de secagem de no mínimo 24 h em uma dessecadora com sílica antes e depois de irem a campo, com o intuito de retirar o máximo de umidade para posteriormente serem pesados por uma balança analítica da marca Shimadzu modelo AUW220D com precisão de $\pm 0,01$ mg, obtendo-se assim as massas inicial e final do papel filtro.

Para determinar as concentrações dos particulados PTS, MP₁₀ e MP_{2,5} foi utilizada a Equação 1 a seguir:

$$C_{MP} \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = \frac{mf - mi}{V} \times 10^6 \quad (1)$$

Onde: C_{MP} = concentração do material particulado em $\mu g/m^3$; mf = massa final do filtro (g); mi = massa inicial do filtro (g); V = volume amostrado (m^3) e 10^6 corresponde ao fator de conversão de gramas para microgramas.

A partir das concentrações dos poluentes nas diversas campanhas foram realizadas avaliações comparativas de PTS, MP₁₀, MP_{2,5} e O₃ em relação aos níveis estabelecidos e recomendados pela CONAMA 491/18, EPA, Diretiva 2008/50/EU e OMS.

Por fim, foi utilizado o Índice de Qualidade do Ar (IQAr) com o intuito de melhorar e simplificar a apresentação dos dados referente ao monitoramento dos poluentes da área urbana em questão. Para o cálculo do IQAr foi utilizado a Equação 2 (EPA, 2006) que converte as concentrações dos poluentes do ar em um número adimensional, correspondente a um índice que está relacionado a um nível de qualidade do ar representado por uma cor conforme apresentado na Tabela 1.

$$IQAr = I_{ini} + \left(\frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \right) * (C - C_{ini}) \quad (2)$$

Onde: I_{ini} = valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa; I_{fin} = valor do índice que corresponde à concentração final da faixa; C_{ini} = concentração inicial da faixa em que se localiza a concentração medida; C_{fin} = concentração final da faixa em que se localiza a concentração medida; C = concentração medida do poluente.

Tabela 1 – Estrutura do índice de qualidade do ar.

Índice de qualidade do ar							
Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m ³) 24h	MP _{2,5} (µg/m ³) 24h	O ₃ (µg/m ³) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ (µg/m ³) 1h	SO ₂ (µg/m ³) 24h
N1 – Boa	0 – 40	0 – 50	0 – 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200	0 – 20
N2 – Moderada	41 – 80	>50 – 100	>25 – 50	>100 – 130	>9 – 11	>200 – 240	>20 – 40
N3 – Ruim	81 – 120	>100 – 150	>50 – 75	>130 – 160	>11 – 13	>240 – 320	>40 – 365
N4 – Muito Ruim	121 – 200	>150 – 250	>75 – 125	>160 – 200	>13 – 15	>320 – 1130	>365 – 800
N5 – Péssima	>200	>250	>125	>200	>15	>1130	>800

Fonte: CETESB (2013).

4.4 Monitoramento do Conforto Térmico

As análises de conforto térmico foram realizadas a partir das fórmulas empíricas correspondentes ao índice de calor (Equação 3), índice de desconforto de Thom (Equação 4) e temperatura efetiva em função do vento (Equação 5) propostas por Rothfusz (1990), Thom (1959) e citada por Suping *et al.* (1992). Para as estimativas neste tipo de metodologia foram empregados os valores dos parâmetros meteorológicos de umidade relativa do ar, temperatura do ar e velocidade dos ventos levantados durante a pesquisa na área sob investigação.

$$IC = -42,379 + (2,04901523 * Ta) + (10,14333127 * UR) - (0,22475541 * Ta * UR) - (0,00683783 * Ta^2) - (0,05481717 * UR^2) + (0,00122874 * Ta^2 * UR) + (0,0085282 * Ta * UR^2) - (0,00000199 * Ta^2 * UR^2) \quad (3)$$

$$IDT = Ta - (0,55 - 0,0055 * UR) * (Ta - 14,5^{\circ}C) \quad (4)$$

$$TEv = 37 - \frac{(37-Ta)}{0,68-(0,0014*UR)+\left(\frac{1}{1,76+1,4*V^{0,75}}\right)} - 0,29 * Ta * \left(1 - \left(\frac{UR}{100}\right)\right) \quad (5)$$

Onde: IC = índice de calor, IDT = índice de desconforto de Thom, TEv = Temperatura efetiva em função do vento, Ta = Temperatura do ar, UR = Umidade relativa do ar e V = velocidade dos ventos.

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam as faixas de conforto e sensação térmica referentes a cada índice de conforto citado anteriormente.

Tabela 2 – Faixas de alerta do índice de calor (IC) e seus efeitos a saúde humana.

Faixa de alerta	Índice de calor	Efeitos do IC
Perigo extremo	$IC > 54\text{ }^{\circ}\text{C}$	Insolação e risco de acidente vascular cerebral (AVC) iminente.
Perigo	$41\text{ }^{\circ}\text{C} < IC \leq 54\text{ }^{\circ}\text{C}$	Câimbras, insolação e provável esgotamento, além de possibilidade de AVC.
Cautela extrema	$32\text{ }^{\circ}\text{C} < IC \leq 41\text{ }^{\circ}\text{C}$	Possibilidades de câimbras, esgotamento e insolação.
Cautela	$27\text{ }^{\circ}\text{C} < IC \leq 32\text{ }^{\circ}\text{C}$	Possibilidade de fadiga.
Não há alerta	$IC \leq 27\text{ }^{\circ}\text{C}$	Não há problemas.

Fonte: Adaptado de Nóbrega e Lemos (2011).

Tabela 3 – Faixas de classificação do índice de desconforto de Thom (IDT) ajustado a cidade de João Pessoa*.

Faixa	Índice de desconforto de Thom	Nível de desconforto térmico
1	$IDT < 24\text{ }^{\circ}\text{C}$	Confortável
2	$24\text{ }^{\circ}\text{C} \leq IDT \leq 26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Parcialmente confortável
3	$26\text{ }^{\circ}\text{C} < IDT < 28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Desconfortável
4	$IDT \geq 28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Muito desconfortável

* Como não há faixas do IDT para a cidade de Fortaleza foi utilizado a classificação da capital paraibana, pois as duas cidades são tropicais e litorâneas, estando localizadas no nordeste brasileiro a uma distância de aproximadamente 556 km em linha reta, com variáveis climatológicas que podem ser consideradas similares.

Fonte: Santos *et al.* (2012).

Tabela 4 – Faixas de sensação da temperatura efetiva em função do vento (TEv).

Faixa	TEv	Sensação térmica	Grau de estresse fisiológico
1	$16\text{ }^{\circ}\text{C} \leq TEv < 19\text{ }^{\circ}\text{C}$	Pouco frio	Ligeiro resfriamento do corpo
2	$19\text{ }^{\circ}\text{C} \leq TEv < 22\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ligeiramente fresco	Vasoconstrição
3	$22\text{ }^{\circ}\text{C} \leq TEv < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	Confortável	Neutralidade térmica
4	$25\text{ }^{\circ}\text{C} \leq TEv < 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ligeiramente quente	Ligeiro suor
5	$28\text{ }^{\circ}\text{C} \leq TEv < 31\text{ }^{\circ}\text{C}$	Quente moderado	Suando
6	$31\text{ }^{\circ}\text{C} \leq TEv < 34\text{ }^{\circ}\text{C}$	Quente	Suor em profusão
7	$TEv > 34\text{ }^{\circ}\text{C}$	Muito quente	Falha na termorregulação

Fonte: Adaptado de MASTER (2021).

Um segundo estudo de conforto térmico foi realizado por termografia envolvendo a determinação das temperaturas da superfície dos materiais/elementos presentes nas dependências do *Campus* Fortaleza do IFCE. Experimentalmente foram realizadas 18 campanhas no período correspondente aos meses de setembro a dezembro (estação seca), sendo registradas imagens térmicas nos períodos da manhã (08:00 h até 09:00 h), tarde (12:00 h até 13:00 h) e fim da tarde com início do período noturno na cidade de Fortaleza (17:00 h até 18:00 h) usando uma câmara termográfica modelo FLIR E40bx (Figura 6).

As imagens térmicas foram realizadas a uma distância máxima de 5 m do objeto, estando o termovisor protegido da luz solar no instante do registro fotográfico para evitar reflexos de radiação. Os objetos/materiais avaliados foram solo, grama, banco de concreto, banco de madeira, escada de metal e pedra mineira.

Figura 6 – Câmara termográfica usado nos estudos de conforto térmico nas dependências da área em estudo.



Fonte: Autor (2022).

4.5 Análises Estatísticas

A análise estatística dos poluentes e dos elementos construtivos foi realizada para os parâmetros de média, desvio padrão, valores máximos e mínimos e coeficiente de variação. Além das estatísticas básicas foi aplicado um teste de normalidade (Shapiro-Wilk) com todas as médias amostrais. Em seguida dependendo do tipo de distribuição amostral dos dados médios foram aplicados os coeficientes de correlação de Pearson (normal) ou Spearman (não-normal) a fim de verificar as possíveis associações entre os poluentes e as variáveis meteorológicas na área em estudo.

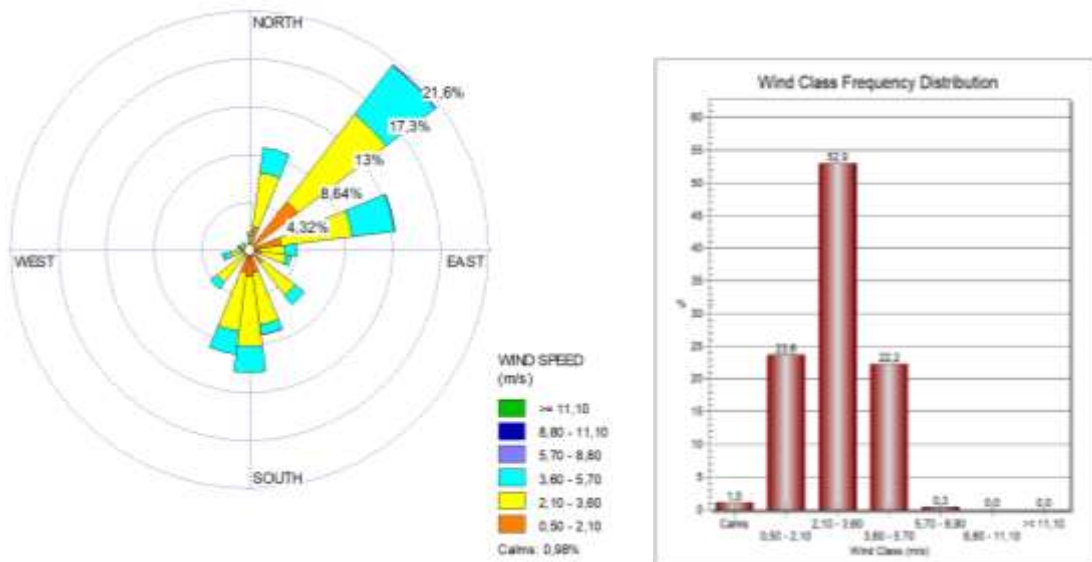
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estudos Meteorológicos

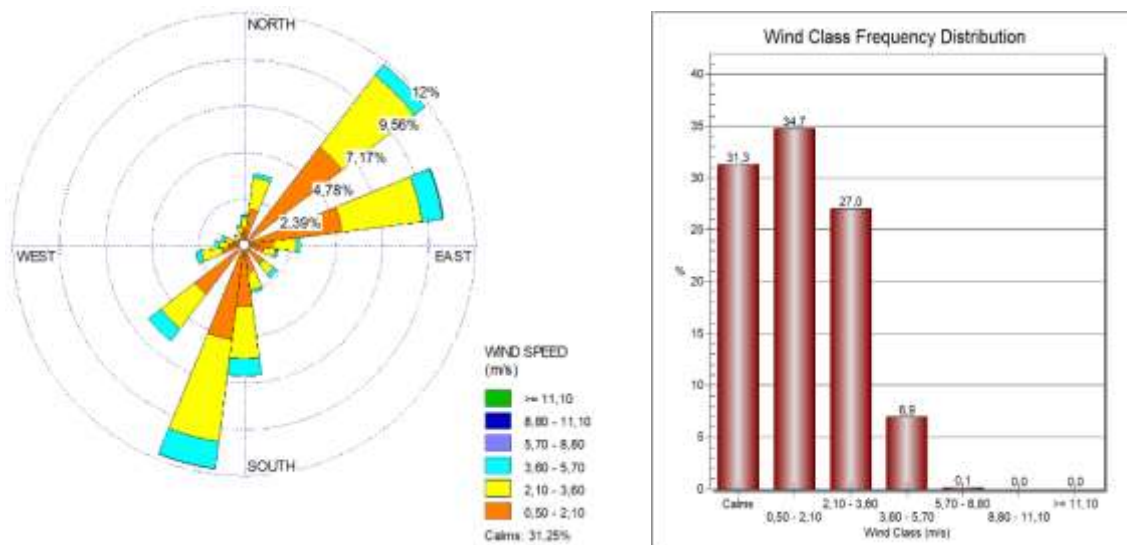
A Figura 7 apresenta a distribuição e os perfis de velocidade e direção dos ventos na área em estudo no período de monitoramento.

Figura 7 – Rosas dos ventos e frequência de intensidade dos ventos na área em estudo no período de 22/09/2021 a 21/03/2022.

a) Estação climatológica seca



b) Estação climatológica chuvosa



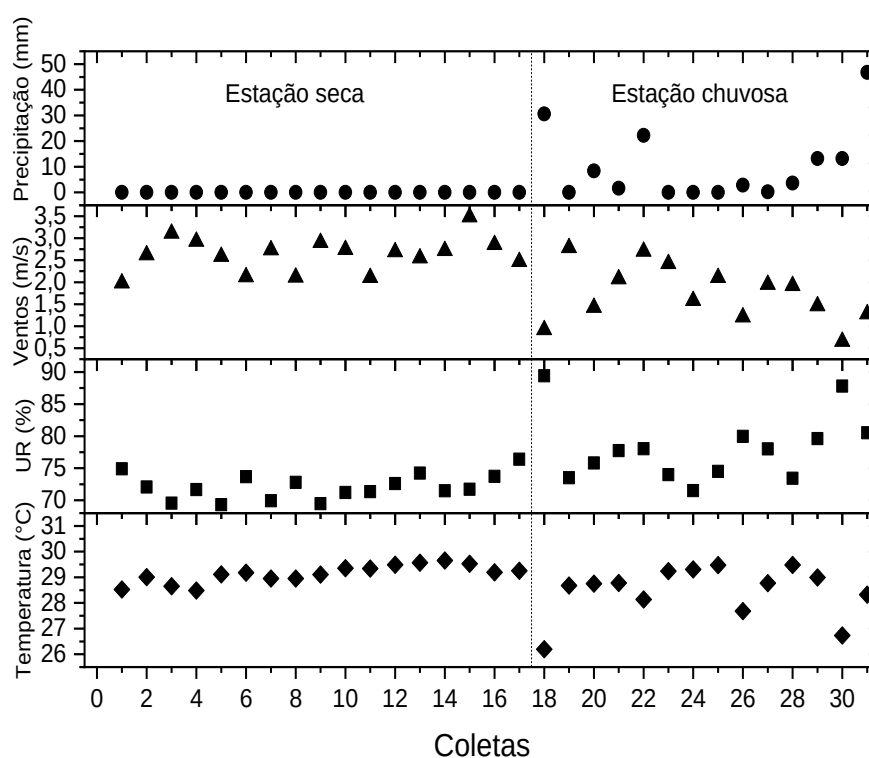
Fonte: Autor (2022).

De acordo com a Figura 7, as rosas dos ventos indicam uma maior frequência dos ventos com velocidades de 2,1 a 3,6 m/s na estação climatológica seca e de 0,5 a 2,1 m/s na estação climatológica chuvosa, sendo que a predominância destes ocorrem nas direções nordeste, leste-nordeste, sul e sul-sudoeste. Lima (2015) observou no seu estudo de qualidade do ar na capital cearense que as direções dos ventos incidiram em maior proporção vindos do nordeste, leste, sudeste e sul ocorrendo de forma similar com a atual pesquisa.

Ainda conforme a Figura 7 foi verificado na estação chuvosa uma redução na intensidade dos ventos de 68,9% correspondentes ao intervalo de 3,6 m/s a 5,7 m/s. Lima (2015) verificou em sua pesquisa que nos meses de abril e maio de 2014 em Fortaleza (período de precipitação) os ventos foram predominantemente calmos, diferentemente dos meses subsequentes em que a intensidade dos ventos foram superiores. Entretanto, Lima (2017) em seu estudo na cidade de Maracanaú, Ceará, relatou que as maiores velocidades dos ventos ocorreram no mês de abril de 2016, sendo este um dos meses que compreende o período chuvoso no estado do Ceará.

Os resultados referentes as variáveis meteorológicas de temperatura, umidade relativa do ar, precipitação e intensidade dos ventos estão dispostos na Figura 8 e Tabela 5.

Figura 8 – Parâmetros meteorológicos observados no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.



Fonte: Autor (2022).

Tabela 5 – Variáveis meteorológicas observadas no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.

Variável meteorológica	Estatísticas					
	N	$\bar{x}$	s	CV	Valor mínimo	Valor máximo
Temperatura do ar (°C)	31	28,8	0,78	0,027	26,2	29,7
Umidade relativa do ar (%)	31	75	4,82	0,064	69,3	89,4
Velocidade dos ventos (m/s)	31	2,2	0,68	0,309	0,7	3,5
Precipitação pluviométrica (mm)	31	4,6	10,7	2,326	0,0	46,8

N: Número de amostras, $\bar{X}$: média, s: desvio padrão e CV: coeficiente de variação.

Fonte: Autor (2022).

Conforme a Tabela 5, a média diária da temperatura do ar durante o período amostrado foi de 28,8 °C; com baixa variabilidade entre os dias avaliados, porém a amplitude térmica atingiu valor máximo de 9,2 °C em 19/02/22. Lima (2015) observou no mesmo sítio de monitoramento da qualidade do ar variações diárias de temperatura semelhantes aos encontrados no atual estudo.

Com relação a umidade relativa do ar (UR) o valor médio encontrado foi de 75%, o que condiz com o fato do município de Fortaleza está situado em área litorânea o que propicia níveis mais elevados de UR. Nas pesquisas realizadas por Azevedo (2014) e Lima (2015) na mesma área de monitoramento, tem-se que os níveis médios de umidade do ar eram de 64,7% e 70,6%, respectivamente, no entanto, o estudo realizado por Azevedo (2014) ocorreu apenas no período seco, época com menor nível de umidade do ar.

Nas cidades cearenses de São Gonçalo do Amarante e Maracanaú na Região Metropolitana de Fortaleza tem-se que a umidade relativa do ar alcançou valores médios de 72,5% e 76,2%, respectivamente (JÚNIOR, 2016; LIMA, 2017)

A velocidade dos ventos alcançou um valor médio de 2,2 m/s. Este valor é inferior aos observados nos estudos de Azevedo (2014) e Lima (2015) na mesma localidade, os quais observaram velocidades média dos ventos de 3,1 m/s e 3,2 m/s; respectivamente.

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nos meses de setembro de 2020 até março de 2021 a capital cearense alcançou médias de velocidade dos ventos, temperatura e umidade relativa do ar na ordem de 2,79 m/s; 27,7 °C e 70%, os quais são relativamente próximos aos encontrados nesta pesquisa (BRASIL, 2022). Vale ressaltar que no período chuvoso os níveis de precipitação pluviométrica variaram de 0 mm a 46,8 mm, para esta pesquisa, Lima (2015) observou em 2014 no mesmo sítio de monitoramento valores semelhantes variando entre 0,6 mm e 51,9 mm ao registrado no atual estudo.

Coelho *et al.* (2021) e Wen *et al.* (2020b) relatam que as variáveis climáticas podem alterar os níveis de poluição ar. Assim, temperaturas mais elevadas contribuem na formação de O_3 , a precipitação favorece a deposição de material particulado do ar para a superfície terrestre e ventos mais intensos proporcionam uma melhor difusão dos poluentes atmosféricos.

Oji e Adamu (2020) avaliaram os efeitos das condições meteorológicas na qualidade do ar na metrópole de Kano/Nigéria, sendo observado que as concentrações dos poluentes estudados (NO_2 , PM_{10} , SO_2 , H_2S e CO) decresce com o aumento da precipitação e da umidade relativa do ar.

5.2 Estudos de Poluição do Ar

Os resultados estatísticos relacionados as concentrações dos poluentes analisados durante o período de monitoramento (setembro de 2021 a março de 2022) estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Concentração diária dos poluentes no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.

Poluente	Estatísticas					
	N*	$\bar{x}$	s	CV	Valor mínimo	Valor máximo
$MP_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	30	19,9	5,36	0,269	11,8	36,7
MP_{10} ($\mu g/m^3$)	30	25,4	7,34	0,289	12,7	47,6
PTS ($\mu g/m^3$)	30	37,9	9,05	0,239	20,9	59,3
O_3 ($\mu g/m^3$) ¹	31	39,8	1,13	0,028	37,0	41,5
COVT (ppb)	31	256,2	202,6	0,791	34,3	719,7
CO_2 (ppm)	31	566,3	60,97	0,108	457,5	657,1

N: Número de amostras, $\bar{x}$: média, s: desvio padrão e CV: coeficiente de variação.

* A coleta 25 no dia 13/02/2022 (domingo) foi desconsiderada em função de um “evento atípico” que ocorreu próxima a área em estudo. Os valores encontrados nesta data foram de $61,7 \mu g/m^3$ para o $MP_{2,5}$; $83,0 \mu g/m^3$ para o MP_{10} e $91,9 \mu g/m^3$ para o PTS. ¹ Medições de 8 h.

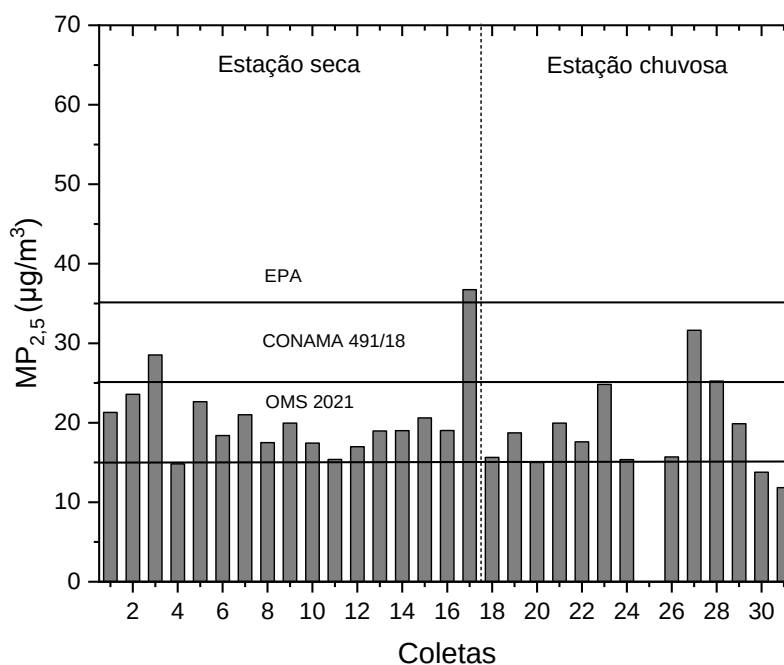
Fonte: Autor (2022).

As partículas inaláveis finas ($MP_{2,5}$) apresentaram concentração média diária de $19,9 \mu g/m^3$, apontando menor desvio padrão em relação aos demais particulados, enquanto as concentrações de MP_{10} e PTS foram, respectivamente, de $25,4 \mu g/m^3$ e $37,9 \mu g/m^3$ (Tabela 6).

Com relação as concentrações de $MP_{2,5}$ foi observado que na estação climatológica seca (17 coletas) um valor médio de $20,7 \mu g/m^3$ e de $18,9 \mu g/m^3$ na quadra chuvosa (13 coletas), os quais apontam para uma redução na ordem de 8,7% deste particulado em função dos

processos de deposição úmida. A coleta 25 não foi considerada nesta discussão e nas demais análises dos demais materiais particulados em função do forte efeito antrópico observado na área quando da sua realização. Comparativamente, o perfil global das concentrações de $MP_{2,5}$ mostra que em quatro (4) coletas foram encontrados valores acima do limite estabelecido para o padrão de qualidade do ar nacional de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CONAMA 491/18). Em contraste, em relação ao nível recomendação pela OMS, um total de vinte e sete (27) coletas se mostraram acima do valor regulamentado de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 9).

Figura 9 – Concentrações de $MP_{2,5}$ (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.

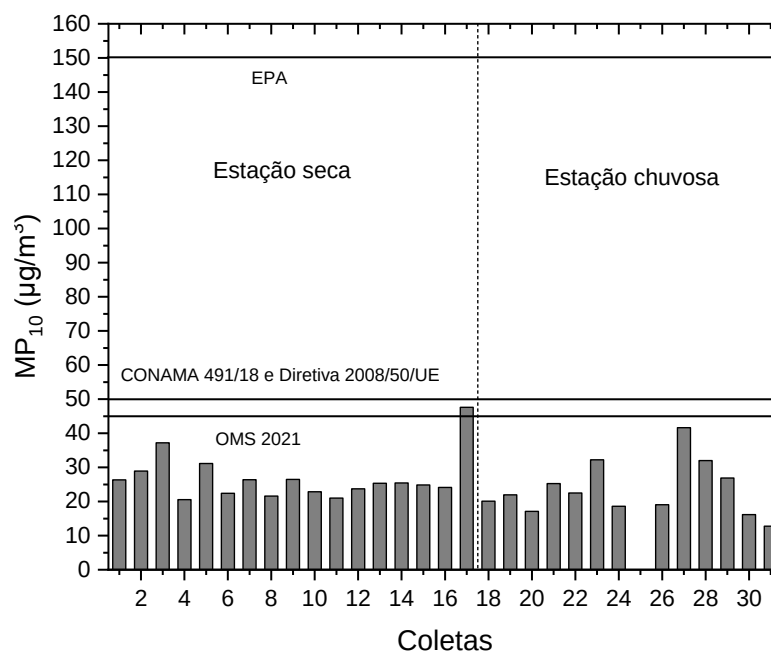


Fonte: Autor (2022).

Ainda na Figura 9 observa-se que para a legislação americana (US EPA) houve apenas uma ultrapassagem relacionado ao $MP_{2,5}$; sendo que o referido padrão de qualidade do para este poluente é menos restritivo que os adotados pela OMS e CONAMA 491/18.

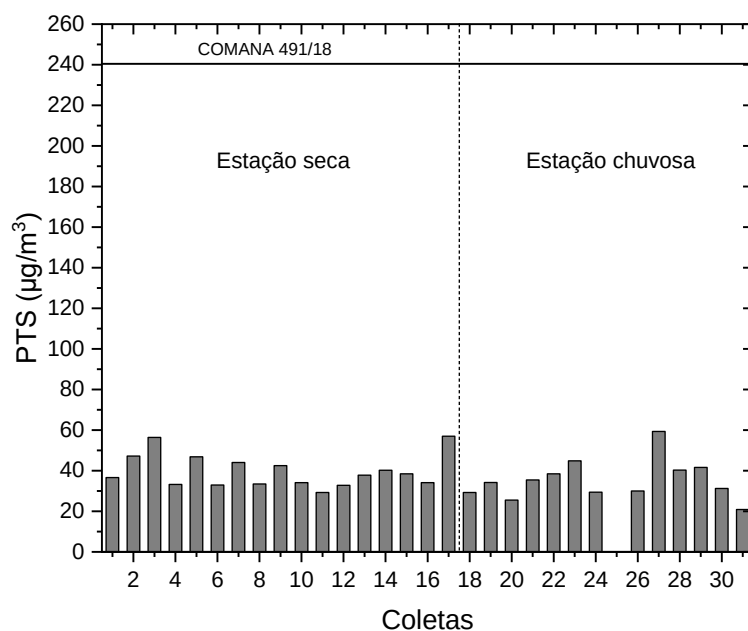
As Figuras 10 e 11 a seguir apresentam os resultados do monitoramento dos poluentes MP_{10} e PTS durante esta pesquisa na área urbana selecionada.

Figura 10 – Concentrações de MP_{10} (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.



Fonte: Autor (2022).

Figura 11 – Concentrações de PTS (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.



Fonte: Autor (2022).

Em relação ao MP_{10} as concentrações encontradas variaram entre $12,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $47,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com valor médio de $25,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Na estação climatológica seca foi encontrado um valor médio de $26,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e de $23,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na quadra chuvosa, os quais indicam uma redução de

12,3% deste particulado em função dos processos de deposição úmida. Em termos de legislação em apenas uma (1) coleta atingiu valor superior as recomendações de qualidade do ar da OMS, cujos valores são mais restritivos em relação aos demais padrões (Figura 10).

Os níveis de PTS exibiram valores mínimo e máximo de $20,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $59,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, com concentração média de $37,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Na estação climatológica seca foi encontrado um valor médio de $39,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e de $35,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na quadra chuvosa, os quais indicam uma redução de 11% deste particulado em função dos processos de deposição úmida. Notadamente quando se considera a legislação nacional (CONAMA 491/18), a única que possui limite estabelecido para este poluente, foi observado em todas as campanhas concentrações muito abaixo do estabelecido nesta legislação brasileira (Figura 11).

Os resultados do monitoramento indicam que os níveis médios de PTS, MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$ ficaram abaixo do recomendado pela legislação brasileira, americana e europeia, porém, o valor médio de $\text{MP}_{2,5}$ foi superior em 90% das coletas ao limite estabelecido pela OMS, o que revela forte preocupação com a presença deste poluente na área em estudo na cidade de Fortaleza.

As pesquisas realizadas por Azevedo (2014), Lima (2015), Júnior (2016), Lima (2017), Sousa (2017) e Brito (2018) na cidade de Fortaleza e em outros municípios cearenses para o monitoramento de particulados mostraram para os materiais particulados PTS, MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$ valores médios superiores aos encontrados neste estudo. Este fato em uma primeira análise pode ser justificado pela questão da pandemia de COVID-19 que ocasionou menores fluxos veiculares e de pedestres na área em estudo, reduzindo as emissões de poluentes no ar.

Azevedo (2014) observou no monitoramento realizado no mesmo trecho urbano da cidade de Fortaleza/Ceará em 2013 que os níveis de PTS, próximos a avenida Treze de Maio, apresentavam concentração média de $105,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tendo alcançado um valor máximo de $154,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e mínimo de $50,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estes valores são bem superiores aos valores de $37,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (média), $59,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (máximo) e $20,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (mínimo) encontrados neste estudo, denotando reduções expressivas deste poluente na área em estudo.

Lima (2015) em 2014 no mesmo sítio relatou concentrações médias para o PTS, MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$ de $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $31,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $21,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, as quais são ainda superiores aos níveis (médias) de $37,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $25,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $19,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ encontrados neste trabalho.

Júnior (2016) avaliou a qualidade do ar em São Gonçalo do Amarante, Ceará, na Região Metropolitana de Fortaleza, obtendo valor médio para o PTS de $48,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com variação de valores entre $75,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $32,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Sousa (2017) em monitoramento da qualidade do ar próximo à avenida Dr. Silas Munguba na cidade de Fortaleza em um sítio distante cerca de 5 km da área em estudo observou uma concentração média de MP_{10} de $48,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com variação de $66,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $34,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Brito (2018) no mesmo local relatou concentrações médias de MP_{10} e $MP_{2,5}$ de $32,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $29,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Lima (2017) realizou estudo de qualidade do ar no Distrito Industrial de Maracanaú/Ceará, verificando que os níveis de poluição do ar relacionados ao PTS e MP_{10} foram de $51,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $42,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A autora observou que os níveis de PTS e MP_{10} na estação seca corresponderam a $64,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $55,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e no período chuvoso a $44,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $36,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, apontando para uma redução de cerca de 31% e 33,5%, respectivamente, entre as diferentes estações climáticas. Em comparação aos resultados do estudo atual tem-se que a redução das concentrações de PTS e MP_{10} na quadra chuvosa devido a processo de deposição úmida em Fortaleza/Ceará foram menores, 11% e 12,3%, respectivamente.

A pesquisa realizada por Lima (2015) no ano de 2014 em comparação ao estudo atual ocorrido na mesma área de monitoramento, percebe-se que houve reduções nas concentrações de PTS, MP_{10} e $MP_{2,5}$ de 48,1%; 19,4% e 7,0%, respectivamente, indicando melhoria na qualidade do ar para tais poluentes. Estas reduções podem ser atribuídas ao quadro de menor atividade urbana durante a pandemia de COVID-9 na cidade de Fortaleza. Rocha *et al.* (2022) mostraram que os níveis de MP_{10} e $MP_{2,5}$ reduziram em 34,9% e 46,4%, respectivamente, na capital cearense em período de bloqueio total para a contenção viral do SARS-CoV-2 em relação ao período anterior a pandemia de COVID-19.

Estudos em diversos países no período de pandemia de COVID-19 corroboram que os limites restritivos de mobilidade (*lockdown*) estabelecidos por diferentes governos contribuíram na redução dos níveis de partículas inaláveis presente no ar.

Sarra e Mülfarth (2021) em sua pesquisa mostraram que a capital paulista obteve melhorias na qualidade do ar relacionado aos particulados, principalmente no início das restrições de mobilidade que tiveram maior adesão da população. Assim, as concentrações antes e durante o bloqueio foram de $31,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $19,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o MP_{10} e de $19,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $10,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o $MP_{2,5}$, correspondente a decréscimos de 38% e 43,7%; respectivamente.

Segundo Noda *et al.* (2021), os níveis médios de MP_{10} e $MP_{2,5}$ mensais obtidos a partir estações paulistas de monitoramento do ar no período de isolamento social devido a pandemia de COVID-19 no mês de abril foram de $26,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $15,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, representando reduções de 4,8% e 10,4%, respectivamente, em relação ao mesmo mês dos anos de 2015 e 2016. Em comparação ao atual estudo, a concentração de MP_{10} atingiu valor similar.

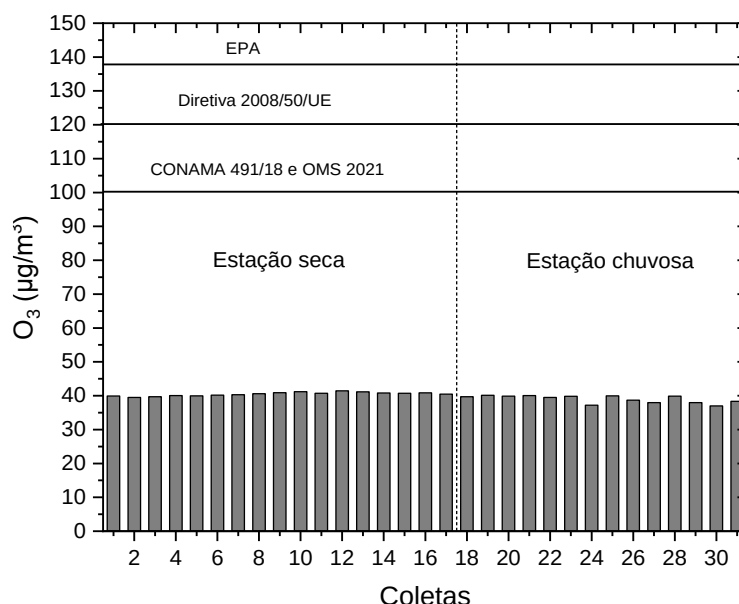
Zoran *et al.* (2020) em Milão na Itália relataram que o nível médio de MP_{10} no período anterior a quarentena de coronavírus foi de $46,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto, durante o momento do bloqueio o valor foi de $24,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este nível de particulado representa um decréscimo de 47% em relação a concentração antes das restrições.

Saxena e Raj (2021) observaram que na capital indiana as concentrações de particulados durante a quarentena foram de $45,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o $MP_{2,5}$ e $81,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o MP_{10} , o que corresponde a reduções nos níveis de $MP_{2,5}$ e MP_{10} de 43,2% e 43,9%, respectivamente em relação ao período anterior ao bloqueio. Ademais, as cidades indianas de Noida e Gurugram também observaram reduções nas concentrações de MP_{10} na ordem de 40%.

Tello-Leal e Macías-Hernández (2021) relataram que a cidade de Victoria no México apresentou melhorias na qualidade do ar durante as restrições de mobilidade impostas para o combate a COVID-19. Os níveis de particulados MP_{10} e $MP_{2,5}$ reduziram cerca de 44,5%, alcançando concentrações de $14,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $15,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no período de bloqueio parcial.

Ainda no contexto do monitoramento atmosférico, a Figura 12 apresenta os valores médios de ozônio em 8 horas observados no trecho urbano na cidade de Fortaleza.

Figura 12 – Concentrações médias de O_3 (8 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.



Fonte: Autor (2022).

A concentração média encontrada para o O_3 neste estudo foi de $39,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com valores entre $37,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $41,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, observando-se assim que não houve variações representativas dos níveis desse poluente durante todo o período de coletas. Por outro lado, observa-se que os níveis de O_3 na quadra chuvosa reduziram cerca de 3,7% fato que pode

ser atribuído ao menor nível de radiação solar, elemento essencial para a formação deste poluente secundário.

Segundo Lima (2017) o nível médio de O_3 presente no município de Maracanaú mensurados em período de 8 h foi de $38,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com variação de $27,9$ a $48,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo observado aumento da concentração de O_3 no horário da tarde. Estes valores são semelhantes aos observados neste estudo.

Sousa (2019) em monitoramento de O_3 próximo à avenida Dr. Silas Munguba, Bairro do Itaperi, localizada na capital cearense relatou uma concentração média de $31,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com valores máximos e mínimos de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$; respectivamente. Em comparação, o estudo atual mostra que houve um acréscimo médio em torno de 25,2% nos níveis de O_3 para o período de pandemia de COVID-19.

Rocha *et al.* (2022) observaram na capital cearense que o nível de O_3 no início do bloqueio parcial reduziu 8% em relação ao período pré-pandemia, posteriormente, houve um acréscimo de 3% no período de *lockdown* e 5,6% na fase de transição de abertura da economia.

Beringui *et al.* (2022) verificaram para a cidade do Rio de Janeiro que a concentração média do O_3 atingiu $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no ano de 2019, sendo que em 2020 (início da pandemia) foram registrados níveis de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o referido poluente. Vale salientar que este nível de O_3 se aproxima dos valores encontrados no presente estudo.

Na pesquisa realizada por Nakada e Urban (2020) durante as restrições de deslocamento na cidade de São Paulo, observou-se que os níveis de O_3 em uma estrada e no centro da cidade apresentaram concentrações de $32,3$ e $40,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ um mês antes do bloqueio e depois variaram para $36,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $44,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, representando um acréscimo de 13,6% e 11%, respectivamente, na concentração deste poluente.

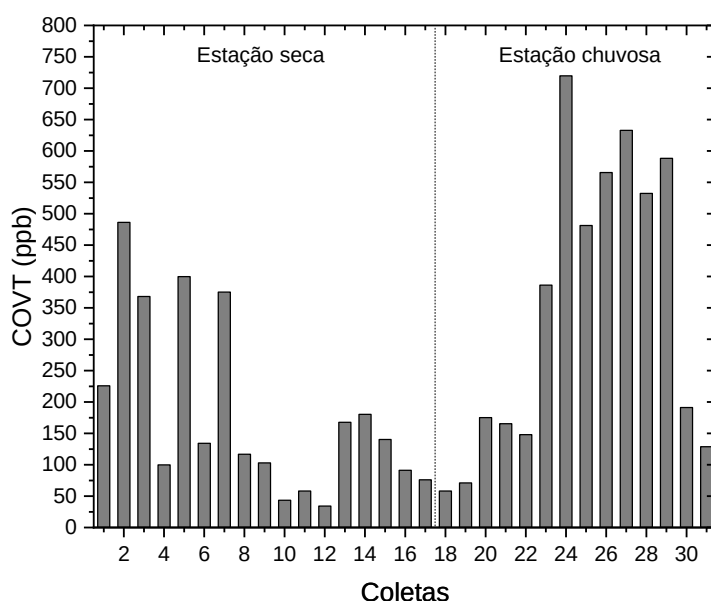
Segundo Hashim *et al.* (2021), o nível médio de O_3 encontrado na capital iraquiana antes da pandemia (16 de janeiro a 29 de fevereiro) era de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, porém a concentração média desse poluente aumentou para $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre os meses de junho e julho do mesmo ano, significando um acréscimo de 525%. Os autores justificam esse aumento devido às altas temperaturas e a redução de 20% do NO_2 .

Jephcote *et al.* (2021) observaram que no Reino Unido no período das restrições de mobilidade houve uma redução de 69% na contagem de veículos automotores nas estradas em relação a abril de 2019. Ademais, foi visto que em Londres houve um aumento de 23% nas concentrações de O_3 , sendo que em locais próximos as estradas inglesas houve um acréscimo médio de 34,1% e no tráfego urbano no bairro londrino de Marylebone a elevação no nível de O_3 foi de 79,5%; se comparado as concentrações anteriores ao bloqueio.

Toro *et al.* (2021) em estudo na região metropolitana de Santiago do Chile relataram um acréscimo de 63% na concentração de O_3 passando de $25 \mu g/m^3$ para $41 \mu g/m^3$ quando se compara o período histórico de 2017 a 2019 com o ano de 2020. Nesta comparação relata-se que houve uma redução de 54% no NO_x local.

As variações na concentração de compostos orgânicos voláteis (COVT) durante o período do monitoramento estão apresentadas na Figura 13.

Figura 13 – Concentrações médias de COVT (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.



Fonte: Autor (2022).

Os resultados da Figura 13 mostram que a concentração média de COVT observada foi de 256,2 ppb com variação de 719,7 ppb a 34,3 ppb. Assim, como não há normatização acerca dos níveis de COVT em ambientes externos, considerou-se para tal avaliação de qualidade do ar a legislação para ambientes internos da Agência Ambiental Federal Alemã (UBA, 2007) que recomenda valores inferiores a $1 mg/m^3$ de COVT como limite seguro, equivalendo a 436 ppb conforme a equação de NABERS (2018), mostrando que o nível médio de 256,2 ppb do período em estudo representa boa uma qualidade do ar.

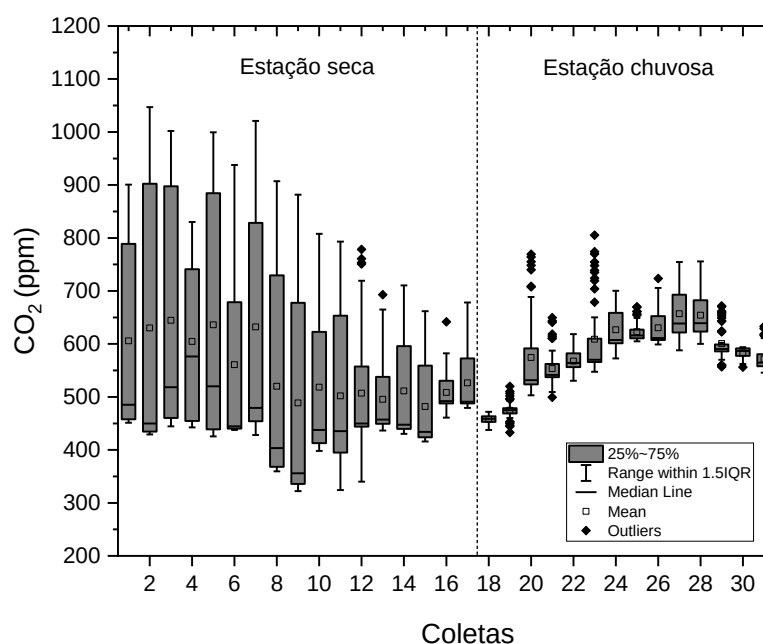
Li *et al.* (2023) realizaram monitoramento da qualidade do ar em Hangzhou/China nos meses de janeiro e fevereiro de 2021 (pandemia de COVID-19) e verificaram que houve uma redução 42% nos níveis de COVT em comparação a outros estudos efetuados na mesma cidade. Ademais, as concentrações de COVT variaram de 10 a 170 ppb com valor médio de 38,2 ppb, os quais são inferiores aos observados neste estudo.

Krecl *et al.* (2020) observaram níveis de COVT relacionados ao tráfego no centro da cidade de Curitiba/PR no ano de 2016 com uma média de 361 ppb e valor máximo de 2176 ppb, valores superiores aos observados nesta pesquisa. Os autores ainda verificaram que a correlação de Pearson (r) entre os COVT e o $MP_{2,5}$ foi de 0,27, o que representa uma associação baixa e positiva entre os poluentes. Este resultado é semelhante ao encontrado nesta pesquisa ($r = 0,368$), conforme será apresentado posteriormente.

Rathod *et al.* (2021) observaram que as concentrações de COV na capital Indiana durante o bloqueio total realizado em 2020 sofreram redução de 38% em relação ao mesmo período de 2019, correspondente a níveis de 943 ppb e 1520 ppb, respectivamente.

As variações das concentrações de CO_2 no trecho urbano durante o período de monitoramento estão apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – Concentrações de CO_2 (24 h) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.



Fonte: Autor (2022).

Conforme a Figura 14, os valores da média e mediana referente a concentração de CO_2 em todo o período do estudo atingiram valores de 566,3 ppm (variação de 657,1 ppm a 457,5 ppm) e 512 ppm (variação de 639 ppm a 356 ppm) respectivamente. Segundo a representação gráfica box-plot foi verificado variações relevantes com relação à média, mediana, intervalos interquartis (IQR) e *outliers* nas diferentes estações climáticas. Assim, na estação seca obteve-se maior IQR (257,3) e menores valores de média (551,3 ppm) e mediana

e (463,4 ppm) comparados a estação chuvosa que apresentou IQR (34,5) e média e mediana de 584,6 ppm e 571,1 ppm; respectivamente.

Vale ressaltar que na estação seca houve menos *outliers* (valores discrepantes) que na quadra chuvosa e maiores variações diárias nos níveis desse poluente, alcançando valores máximos e mínimos de 1047 ppm e 322 ppm, respectivamente. Na estação chuvosa os valores encontrados atingiram máximo de 805 ppm e mínimo de 433 ppm.

Como não há padrão de qualidade do ar externo para o CO₂ foi utilizado a resolução RE/ANVISA N° 09 de 16 de janeiro de 2003 (BRASIL, 2003), a qual estabelece valor igual ou inferior a 1000 ppm de CO₂ para ambiente interno, concentração considerada segura para o bem-estar e conforto humano. Ademais, como no presente estudo os valores médios diários não ultrapassam tal limite, tem-se que o ambiente em questão possui boa qualidade do ar para o período analisado.

Gomes, Silva e Silva (2019) após monitoramento realizado na avenida Treze de Maio em Fortaleza/Ceará no mês de junho de 2017, a uma distância de 90 metros do sítio de monitoramento da atual pesquisa, relataram níveis médios de 716 ppm de CO₂, com concentrações pontuais variando entre 996 ppm a 447 ppm. Assim, observa-se que em relação ao valor médio de 566,3 ppm (atual pesquisa) há um decréscimo de 20,9% nos níveis médios de CO₂ em período pandêmico.

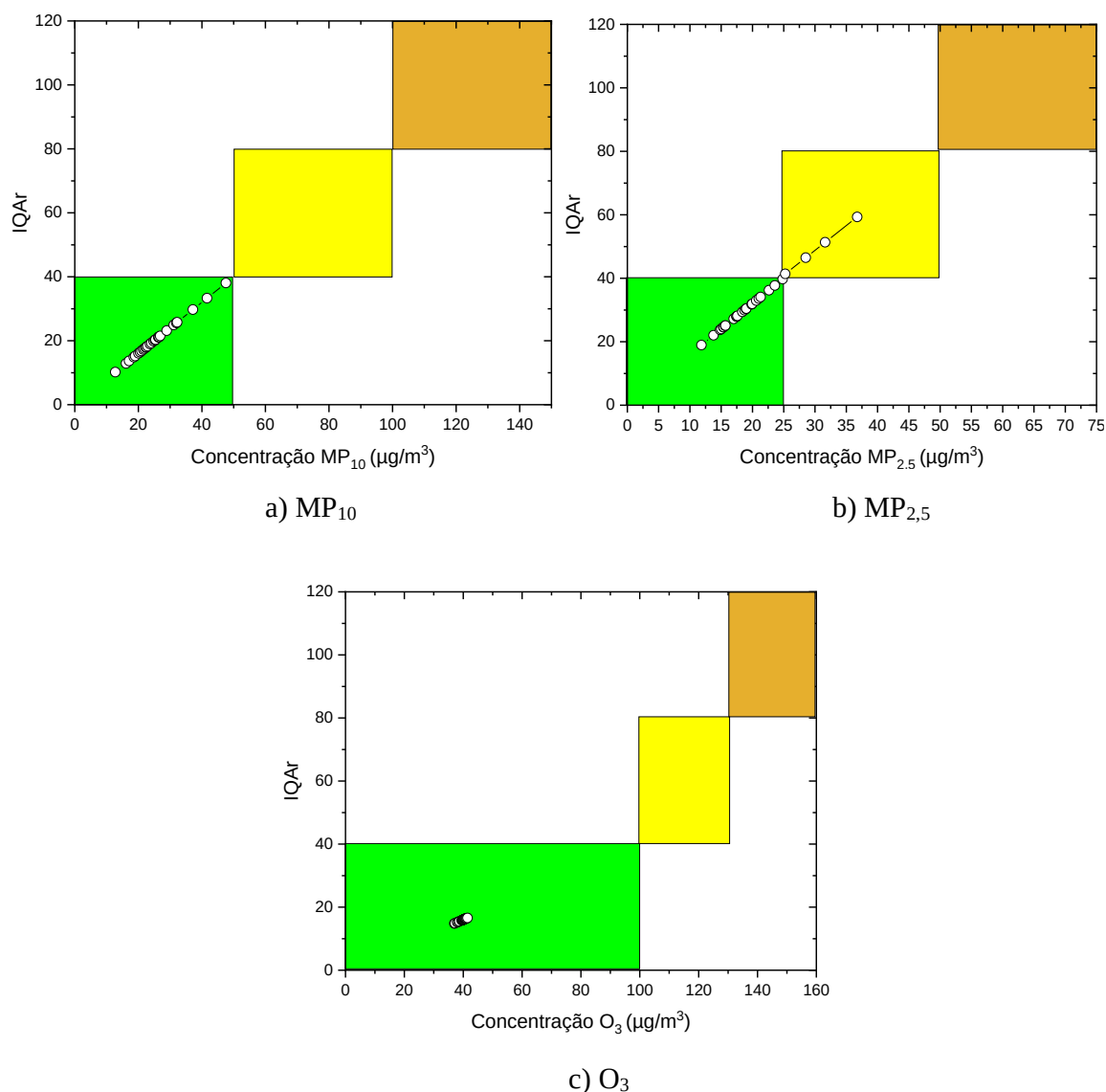
Lee *et al.* (2020) realizaram um monitoramento da qualidade do ar em Sunway na Malásia e relataram que a concentração de CO₂ variou de 414 ppm a 956 ppm com valor médio de 500 ppm, no entanto os autores observaram que o nível de CO₂ foi mais elevada no período da manhã. Este valor médio é semelhante ao encontrado neste estudo.

Schibuola e Tambani (2020) verificaram em uma escola primária localizada na região norte da Itália concentrações de CO₂ presentes em ambientes externos e internos, cujos valores médios variaram de 523 ppm a 418 ppm nas áreas abertas e 1695 ppm e 987 ppm no interior das salas de aulas. Resultados semelhantes ao encontrado nesta pesquisa.

Kim e Choi (2019) observaram os níveis de CO₂ em rodovias urbanas de Xangai, China, obtendo valor médio de 550 ± 20 ppm com variação de 800 a 422 ppm. Zaman *et al.* (2021) observaram em ambientes externos de hospitais que as concentrações de CO₂ alcançou valor médio $856,3 \pm 307,1$ ppm, entretanto, o nível deste poluente foi maior no período de inverno que no pós-monção.

A Figura 15 apresenta os valores do índice de qualidade do ar (IQA_r) no trecho urbano na cidade de Fortaleza estimados nesta pesquisa.

Figura 15 – Índices de qualidade do ar (IQAr) para diferentes poluentes no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.



Legenda: Verde (qualidade do ar “Boa”), Amarelo (qualidade do ar “Moderada”), Alaranjado (qualidade do ar “Ruim”). Fonte: Autor (2022).

Na área em estudo, a qualidade do ar estabelecida por meio do IQAr (CETESB) mostrou que o IQAr obtido para o MP₁₀ foi avaliado como **bom** em todos os dias amostrados com 100% das coletas apresentando valores nesta faixa de qualidade (Figura 15a). Da mesma forma todas as concentrações (100%) de O₃ no período em análise foram classificadas em uma escala de qualidade **boa** (Figura 15c). A qualidade do ar referente ao MP_{2,5} (Figura 15b) mostra um IQAr **bom** em 87% das coletas e **moderado** em 13% das campanhas.

De acordo com Lima (2015) o nível da qualidade do ar realizado no mesmo sítio da atual pesquisa obteve resultados similares com relação ao IQAr, no qual o MP₁₀ atingiu a escala **boa** em 97% do período analisado, enquanto o MP_{2,5} manteve no período amostrado qualidades do ar tipo **boa**, **moderada** e **ruim** em 84%, 13% e 3% das coletas, respectivamente.

Lima (2017) em seu monitoramento na cidade de Maracanaú relatou IQAr para o MP₁₀ como **bom** em 83,33% das coletas realizadas, sendo que O₃ foi classificado como **bom** em todo o período do seu estudo. Comparando com a pesquisa atual, o O₃ apresenta comportamento equivalente ao estudo dessa autora.

Na Tabela 7 a seguir foi executada uma análise de correlação entre os poluentes atmosféricos monitorados e as variáveis meteorológicas no período do estudo. Os resultados encontrados mostram correlações (r,rs) entre todos os particulados valores superiores a 90% ($> 0,910$); indicando uma associação **muito forte e positiva**. Em relação ao O₃ há uma correlação **forte e negativa** com o CO₂ ($r,rs = - 0,623$) e COVT ($r,rs = - 0,658$). Ademais, tem-se que a associação entre o CO₂ e o COVT foi **forte e positiva** ($r,rs = + 0,811$). Correlações **fortes e positivas** também foram verificadas entre os níveis de ozônio com a temperatura do ar e a velocidade dos ventos.

Lee *et al.* (2020) observaram em uma área comercial localizada na cidade de Sunway, Malásia que os níveis de CO₂ apresentaram correlações (r) de $- 0,335$ e $- 0,216$ com a velocidade dos ventos e a temperatura do ar, respectivamente, sendo estes valores similares aos observados neste estudo. Ademais, os autores perceberam uma associação fraca e positiva ($r = + 0,271$) entre o CO₂ e a umidade relativa do ar, sendo que o parâmetro meteorológico mais importante na redução dos níveis de CO₂ foi a intensidade dos ventos.

Lima (2017) observou em seu monitoramento realizado na região metropolitana de Fortaleza na cidade de Maracanaú, Ceará uma correlação moderada positiva ($r = + 0,6766$) entre o PTS e o MP₁₀, no entanto, a precipitação se relacionou de forma fraca e negativa ($r = - 0,2967$ e $r = - 0,3298$) com o PTS e o MP₁₀, respectivamente, sugerindo que o processo de deposição úmida contribui na redução da poluição desses particulados, como também observado neste estudo de monitoramento.

Tabela 7 – Matriz de correlação para os poluentes atmosféricos e parâmetros meteorológicos no monitoramento da qualidade do ar no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.

Parâmetro	MP _{2,5}	MP ₁₀	PTS	O ₃	CO ₂	COVT	Temperatura do ar	Umidade relativa do ar (UR)	Precipitação pluviométrica	Velocidade dos ventos
MP _{2,5}	1									
MP ₁₀	0,957	1								
PTS	0,917	0,943	1							
O ₃	0,051	0,115	0,014	1						
CO ₂	0,344	0,330	0,352	-0,623	1					
COVT	0,368	0,330	0,391	-0,658	0,811	1				
Temperatura do ar	0,280	0,363	0,231	0,602	-0,205	-0,035	1			
UR	-0,220	-0,284	-0,289	-0,517	-0,019	0,094	-0,490	1		
Precipitação pluviométrica	-0,312	-0,333	-0,307	-0,630	0,121	0,169	-0,571	0,753	1	
Velocidade dos ventos	0,319	0,353	0,441	0,623	-0,201	-0,356	0,334	-0,696	-0,677	1

As correlações de Pearson (normal) e Spearman (não-normal) foram utilizadas de acordo com os resultados dos testes de normalidade Shapiro-Wilk apresentados na Tabela 8. A classificação de Callegari-Jacques (2009) foi adotada neste estudo para as faixas de correlação de r (normal) e r_s (não-normal): 0 = sem relação; $0 < r, r(s) \leq |0,3|$ (fraco); $|0,3| < r, r(s) \leq |0,6|$ (moderado); $|0,6| < r, r(s) \leq |0,9|$ (forte); $|0,9| < r, r(s) < |1|$ (muito forte) e ± 1 (correlação perfeita). Observação: o sinal de (+) significa correlação ascendente (positiva) e o de (-) correlação descendente (negativa). Fonte: Autor (2022).

Tabela 8 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk.

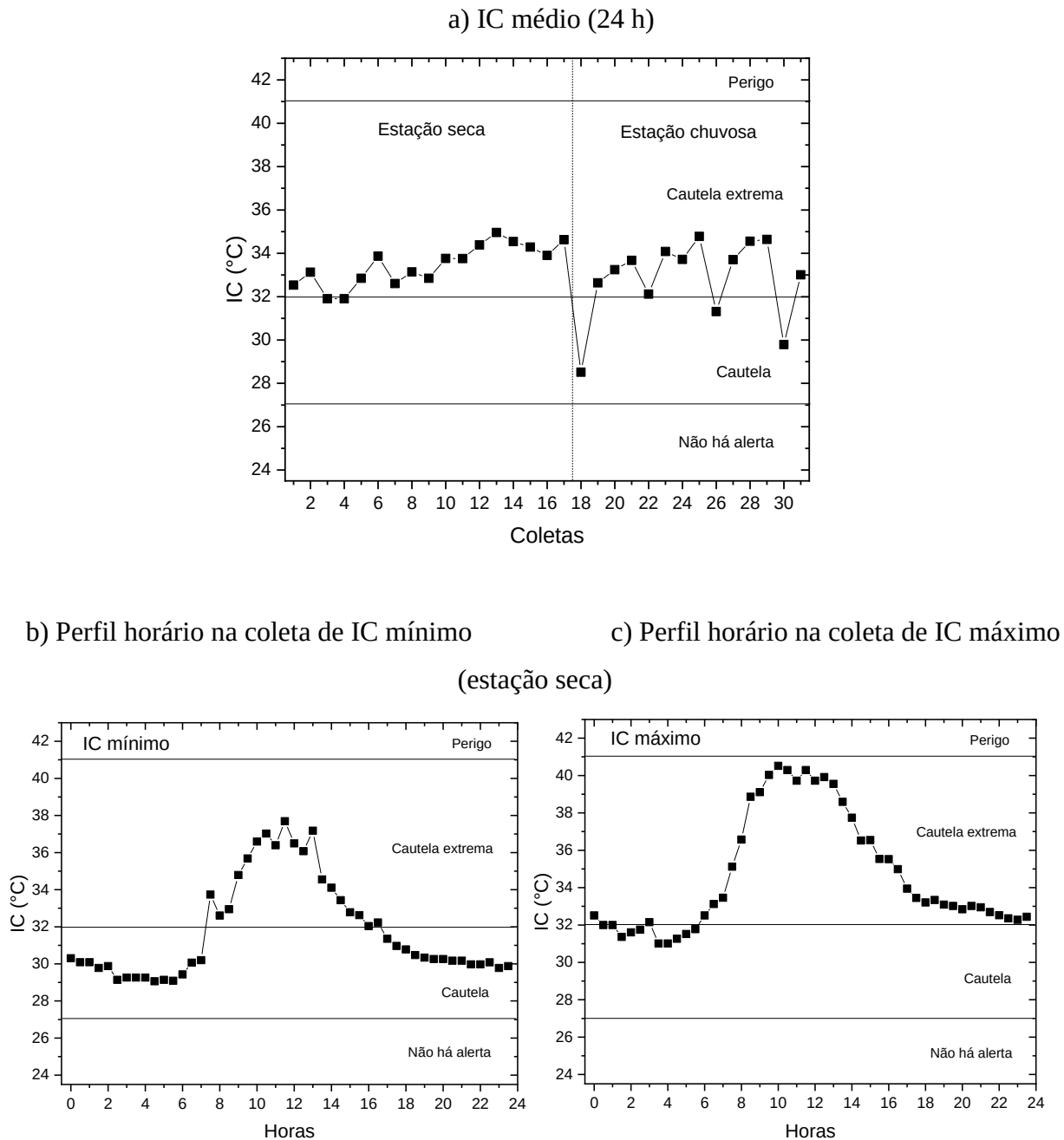
Shapiro-Wilk Test	MP _{2,5}	MP ₁₀	PTS	O ₃	CO ₂	COVT	Temperatura do ar	UR	Precipitação pluviométrica	Velocidade dos ventos
W-stat	0,8922	0,9143	0,9443	0,8974	0,9323	0,8628	0,7926	0,8522	0,5123	0,9534
<i>p</i> -value	0,0053	0,0192	0,1191	0,0062	0,0501	0,0009	3,77E-05	0,0006	5E-09	0,1939
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	não	não	sim	não	sim	não	não	não	não	sim

Fonte: Autor (2022).

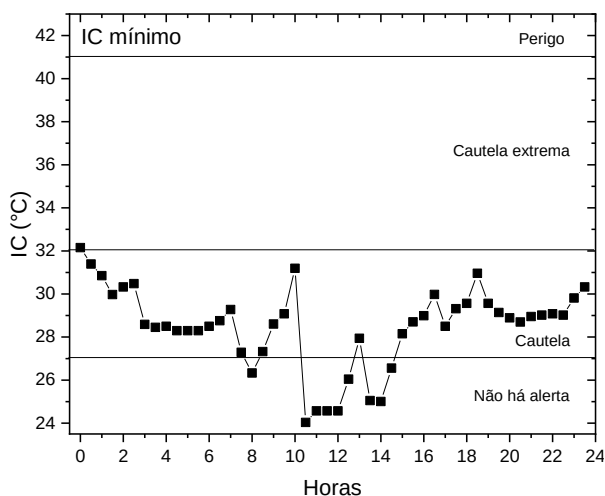
5.3 Estudos de Conforto Térmico

As Figuras 16, 17 e 18 a seguir apresentam os resultados de conforto térmico na área em estudo considerando os valores dos parâmetros meteorológicos monitorados em todo o período da pesquisa (setembro de 2021 a março de 2022).

Figura 16 – Índice de calor (IC) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.

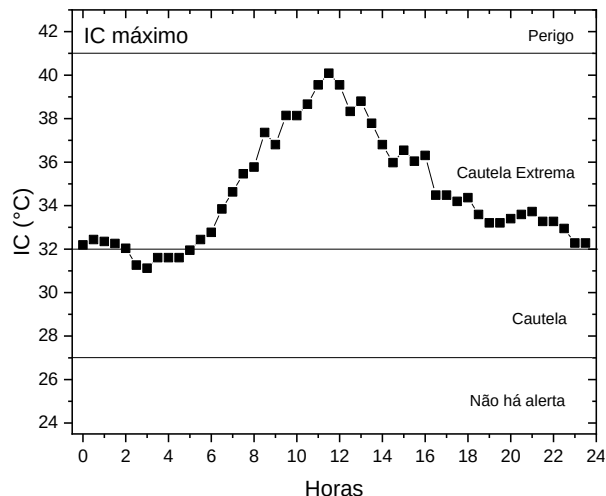


d) Perfil horário na coleta de IC mínimo



e) Perfil horário na coleta de IC máximo

(estação chuvosa)



Fonte: Autor (2022).

Conforme a Figura 16a observa-se que o índice de calor foi mais intenso no período climatológico seco, atingindo maior valor médio de IC diário próximo de 35 °C. Em geral, 84% dos dias avaliados estão em situação de **cautela extrema** e 16% na faixa de **cautela**. As coletas 3 e 4 na estação seca (dias 04/10/2021 e 10/10/2021, respectivamente) e as coletas 18, 26 e 30 na estação chuvosa (dias 02/01/2022, 19/02/2022 e 15/03/2022, respectivamente) representa os dias “mais confortáveis” quanto ao nível de calor observado.

As Figuras 16b e 16c apresentam os perfis horários do IC nas coletas em que se observam os valores médios mínimo e máximo deste índice térmico na estação seca, os quais são representados pelas coletas 4 (em 10/10/2021) e 13 (em 03/12/21), respectivamente.

No dia menos desconfortável da estação seca (IC mínimo, Figura 16b), o intervalo térmico mais intenso ocorreu das 10:00 h às 13:00 h com pico térmico de 37,7 °C ocorrido às 11:30 h. Vale ressaltar que cerca de 40% deste dia apresentou um nível **de cautela extrema**.

Notadamente, na coleta de IC máximo (Figura 16c), mais desconfortável, os valores próximos da faixa de perigo foram alcançados no intervalo das 9:00 h às 13:00 h com pico térmico de 40,5 °C às 10:00 h. Oportunamente, observa-se que em cerca de 80% desse dia a condição térmica refletiu uma situação de **cautela extrema** relacionado ao nível de calor.

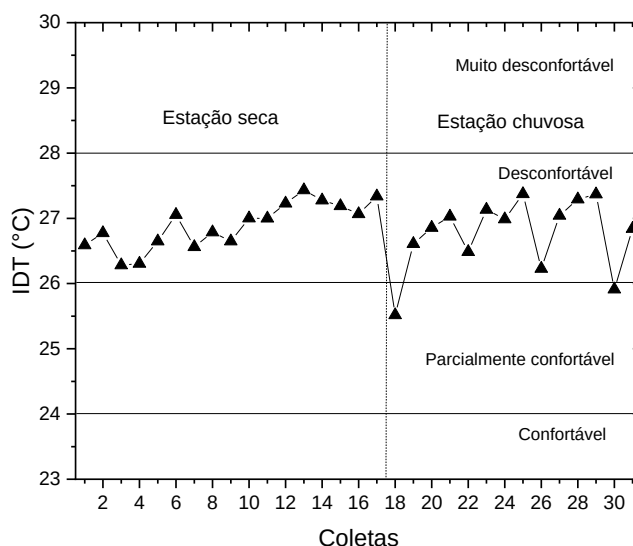
As Figuras 16d e 16e apresentam os perfis horários do IC nas coletas em que se identificam os valores médios mínimo e máximo deste índice térmico na estação climatológica chuvosa, os quais são representados pelas coletas 18 (em 02/01/2022) e 25 (em 13/02/2022), respectivamente.

Na coleta de IC mínimo (Figura 16d) observa-se um estado térmico de **cautela** em cerca de 80% do dia e cerca de 20% não caracteriza situação de **alerta** térmico. Para o perfil diário na data de IC máximo (Figura 16e) observa-se um estado térmico de **cautela extrema** em 88% do dia com pico térmico de 40,1 °C ocorrendo às 11:30 h próximo a faixa de **perigo**.

A Figura 17 apresenta os perfis de conforto térmico relacionados a determinação do índice de desconforto de Thom (IDT) na área em estudo.

Figura 17 – Índice de desconforto de Thom (IDT) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.

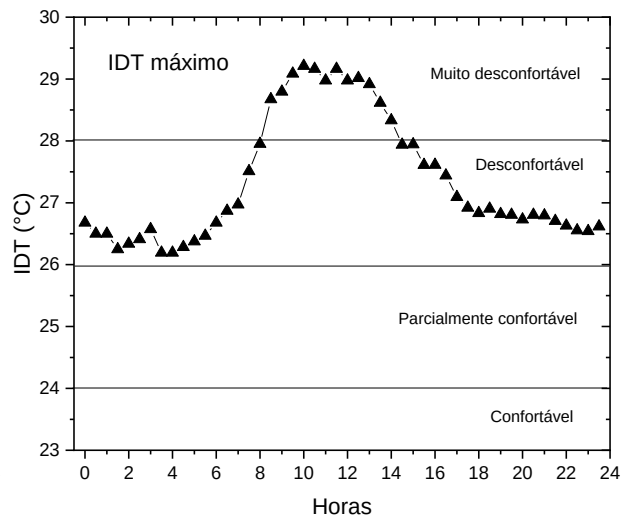
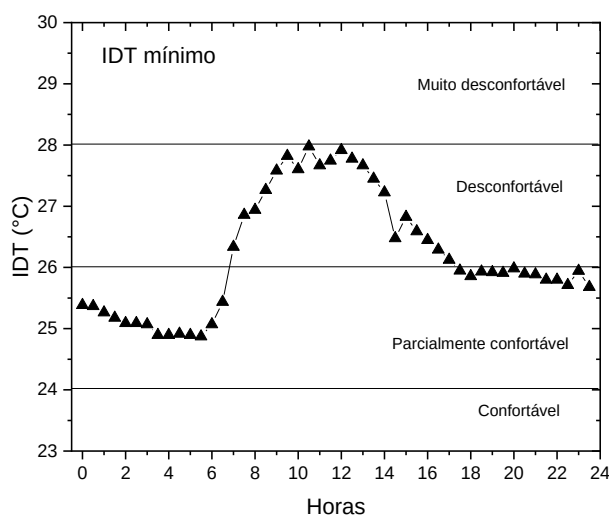
a) IDT médio (24 h)



b) Perfil horário na coleta de IDT mínimo

c) Perfil horário na coleta de IDT máximo

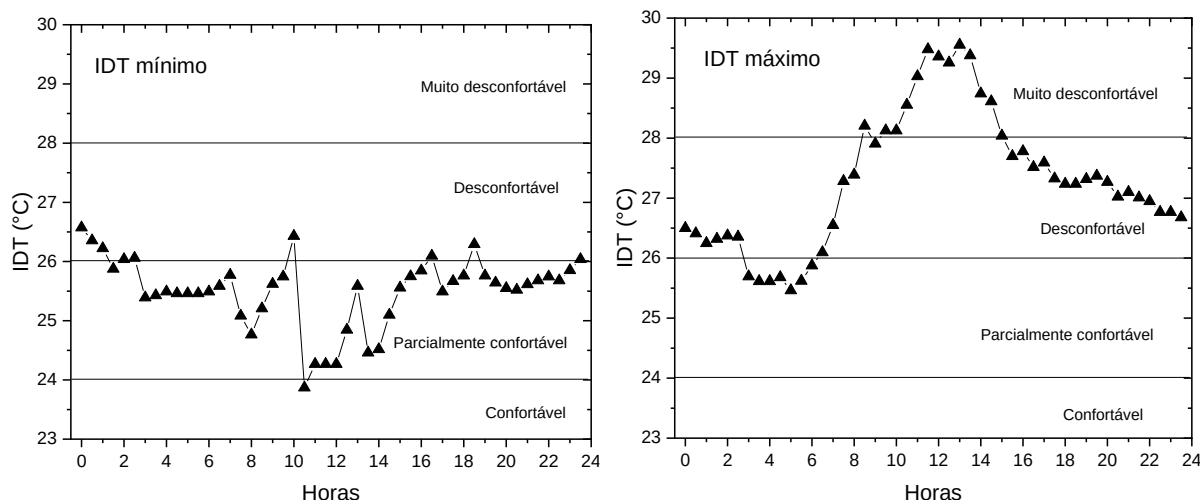
(estação seca)



d) Perfil horário na coleta de IDT mínimo

e) Perfil horário na coleta de IDT máximo

(estação chuvosa)



Fonte: Autor (2022).

A Figura 17a mostra que os níveis de IDT em cerca de 94% das campanhas, independente da estação climática, estando situados na categoria **desconfortável**, e em apenas duas coletas os valores de IDT indicaram status de **parcialmente desconfortável**. A elevada % de desconforto térmico determinada pelo IDT está em acordo com a alta % de cautela extrema estimada pelo IC, ratificando uma situação de limitado conforto térmico na cidade de Fortaleza.

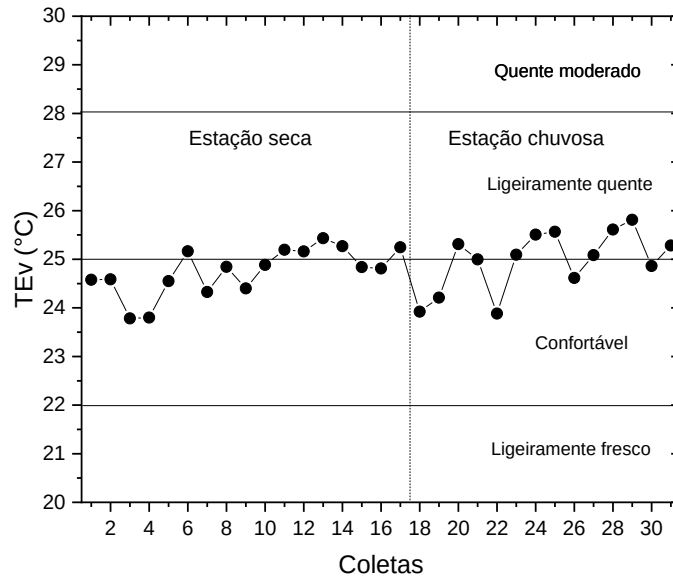
As Figuras 17b e 17c apresentam os perfis das coletas (ou dias) de menor e maior desconforto térmico na cidade de Fortaleza no intervalo em estudo, considerado os valores de IDT na estação seca. Assim, na coleta 3 (04/10/2021) correspondente ao valor mínimo de IDT (dia menos desconfortável) observa-se que em cerca de 45% do dia a situação térmica é de **desconforto**, enquanto o restante do dia está na categoria de **parcialmente confortável**, com pico térmico de 27,9 °C às 10:30 h. Para a coleta 13 (03/12/2021) que apresenta IDT máximo (dia mais desconfortável), o nível de **muito desconfortável** ocorre no período das 8:30 h às 14:00 h, correspondendo a um pico térmico de 29,2 °C ocorrido às 10:00 h.

As Figuras 17d e 17e mostram que no período chuvoso os níveis de IDT mínimo e máximo correspondem as coletas 18 e 29, em 02/01/2022 e 09/03/2022, respectivamente. Na coleta para IDT mínimo observa-se que cerca de 80% do dia apresenta uma situação térmica ambiental de **parcialmente confortável**, tendo alcançado menor carga térmica (23,9 °C) às 10:30 h que está inserindo na faixa **confortável**. Em relação ao dia com IDT máximo observa-se que em cerca de 58% do dia o perfil térmico é **desconfortável**, sendo que o intervalo entre 11:00 h e 13:30 h foi o mais crítico (pico térmico de 29,5 °C), enquadrado na categoria de **muito desconfortável**.

A Figura 18 apresenta os perfis de conforto térmico relacionados a determinação da temperatura efetiva em função do vento (TEv) na área em estudo.

Figura 18 – Temperatura efetiva em função do vento (TEv) no período de 22/09/2021 a 21/03/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.

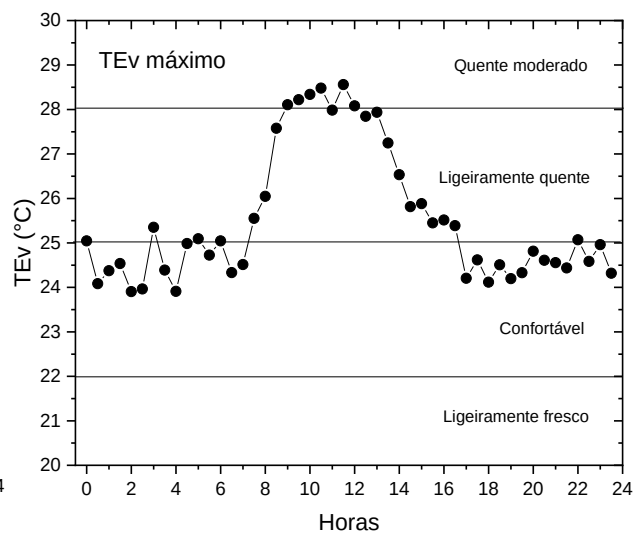
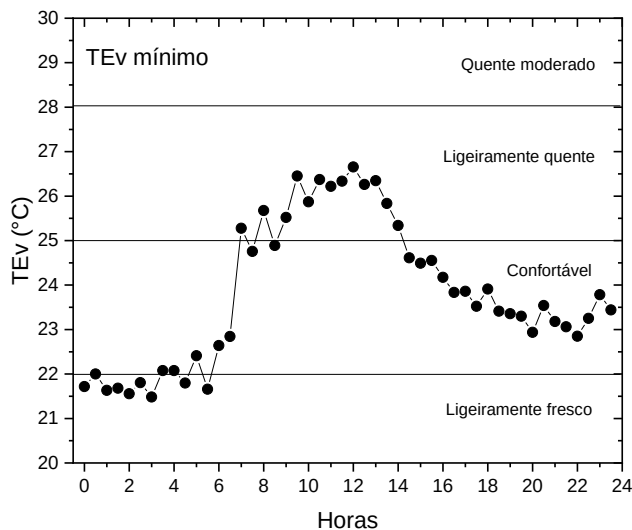
a) TEv média (24 h)



b) Perfil horário na coleta de TEv mínimo

c) Perfil horário na coleta de TEv máximo

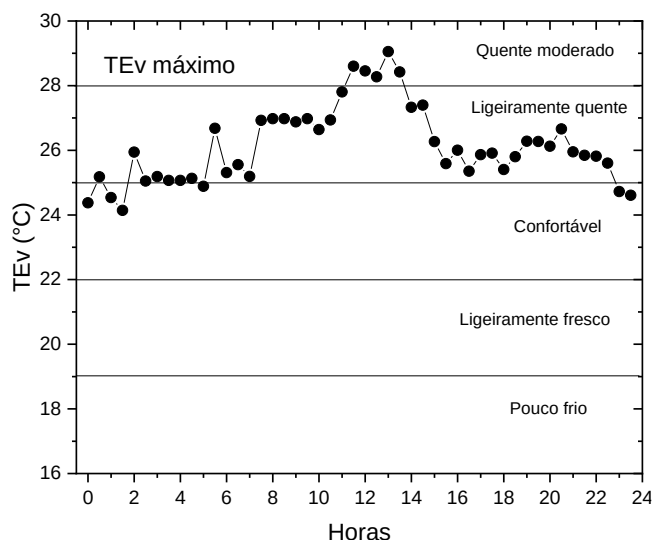
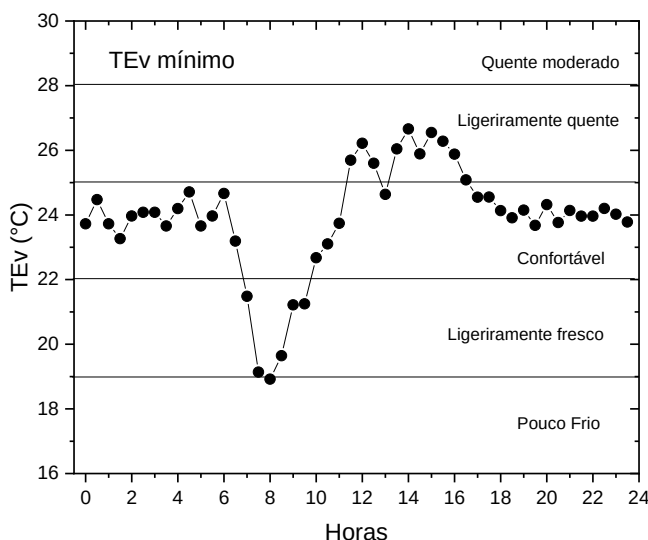
(estação seca)



d) Perfil horário na coleta de TEv mínimo

e) Perfil horário na coleta de TEv máximo

(estação chuvosa)



Fonte: Autor (2022).

De acordo com a Figura 18a verifica-se que 45% dos dias avaliados podem ser classificados como **ligeiramente quente** e os demais (55%) como **confortáveis**. O índice TEv diferentemente dos outros índices abordados utiliza a intensidade dos ventos como fator dissipador de calor, portanto, representa reativamente um cenário térmico mais ameno em relação aos outros índices (IC e IDT).

As Figuras 18b e 18c (estação seca) representam o perfil de TEv mínimo (04/10/21) e máximo (03/12/21) no período de monitoramento. Em relação ao TEv mínimo (coleta 3, Figura 18b) pode-se observar que o pico térmico foi atingido às 12:00 h na faixa do **ligeiramente quente**. Comparativamente nessa data 27% do dia encontra-se com **ligeiramente quente** e 73% nas faixas do **confortável** e do **ligeiramente fresco**. No dia de TEv máxima (coleta 13, Figura 18c), observa-se que 50% do dia mostra-se **confortável** e 36% se apresenta **ligeiramente quente**. A faixa do **quente moderado** foi atingida no intervalo das 9:00 h às 12:00 h e corresponde a apenas 14% do dia.

Na Figura 18d (estação chuvosa) verifica-se que TEv mínimo 67% do dia está em situação **confortável** com menor nível térmico na faixa do **pouco frio** sendo atingido às 8:00 h. Por outro lado, o período que oferece maior nível de desconforto ocorre às 14:00 h. Na condição de TEv máxima (Figura 18e) o pico térmico (29,1 °C) foi observado às 13:00 h, configurando uma sensação de **quente moderado**, porém, cerca de 77% do dia em apresenta-se em estado térmico de **ligeiramente quente**.

A partir de uma análise conjunta dos índices de conforto térmico pode-se inferir que o dia 03/12/2021 (coleta 13, no período seco) no sítio escolhido e no intervalo temporal de monitoramento deste estudo foi o mais **desconfortável termicamente**.

Gomes, Silva e Silva (2019) realizaram um estudo de conforto térmico urbano no mês de junho de 2017 na avenida Treze de Maio em Fortaleza, Ceará usando o índice de desconforto humano (IDH) e verificaram que a referida área apresentou estresse devido ao calor e desconforto térmico de 13,3% e 83,3%, respectivamente. Estes resultados são similares aos observados neste estudo.

Paiva (2018) avaliou o conforto térmico por meio do IDT no bairro Conjunto Ceará na cidade de Fortaleza, Ceará e observou-se uma situação de desconforto predominantemente no horário das 9:00 h às 15:00 h, sendo que na estação chuvosa foi verificado um menor nível de desconforto térmico em relação ao período seco. Tais informações corroboram com os resultados desta pesquisa em relação ao IDT, cuja carga térmica foi menor na quadra chuvosa.

Barboza *et al.* (2019) analisaram o nível de conforto térmico no ano de 2015 na cidade de Iguatu, no centro-sul do estado do Ceará usando os índices de calor (IC) e de desconforto de Thom (IDT). Os autores encontraram um IC de 41,25 °C e um IDT de 29,46 °C, correspondente a faixas de “perigo” por exposição ao calor e “muito desconfortável”, respectivamente. Neste estudo identifica-se que o trecho urbano analisado em Fortaleza para estes índices se enquadra em faixas menos desconfortáveis.

Araújo, Saraiva e Grégio (2017) avaliaram a situação do campo térmico em três praças na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte usando o IC como referência em 24 de maio de 2016. Os locais de estudo apresentaram nível de “cautela extrema” nos horários das 9:00 h às 17:00 h com valores de IC variando entre 36,2 °C e 38,2 °C que compreendeu o período das 12:00 h às 14:00 h. Em relação a atual pesquisa observa-se que os valores de IC estão próximos.

Azevedo *et al.* (2017) em estudos na cidade de Petrolina, Pernambuco no ano de 2012 verificaram por meio do IDT, considerando apenas as temperaturas máximas, que o nível de conforto térmico alcançou as faixas de desconforto térmico e conforto parcial em 28,4% e 71,6% do ano em estudo, respectivamente. Em comparação ao atual estudo, observa-se que a cidade de Petrolina apresentou melhor nível de conforto térmico em relação a Fortaleza que obteve 94% das campanhas classificadas como desconfortável.

Santos *et al.* (2021) realizaram um estudo de conforto térmico na cidade de Santarém, Pará utilizando índices térmicos empíricos e observaram que no período da tarde (12:00 h às 15:00 h) ocorreram as maiores intensidades de ventos, porém, a sensação térmica indicava um ambiente “muito quente” (TEv) e com forte desconforto térmico baseado no índice

de temperatura e umidade. Ademais, os autores verificaram que o índice TEv apresentou maior representatividade quando se considera a percepção térmica das pessoas entrevistadas.

Em uma segunda etapa dos estudos de conforto térmico foi monitorado a temperatura de diferentes materiais construtivos locais. Os resultados encontrados nos meses de setembro a dezembro de 2021, correspondente a estação climatológica seca na cidade de Fortaleza, estão listados na Tabela 9 apresentada a seguir.

Tabela 9 – Temperatura média superficial dos elementos construtivos no período de 22/09/2021 a 27/12/2022 na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.

Temperatura					
Material	Manhã^a	Tarde^b	Fim da tarde^c	Intervalo (°C)	
	°C (Médias)			Valor mínimo	Valor máximo
Pedra mineira	33,9	42,0	31,4	28,2	46,5
Concreto	38,4	51,4	30,8	27,7	59,4
Madeira	37,5	46,9	29,8	28,4	53,1
Metal	37,5	49,6	29,8	28,5	60,7
Grama	34,9	41,7	28,1	26,1	46,7
Areia	39,6	51,4	30,2	27,2	59,3

^a 08:00 h até 09:00 h. ^b 12:00 h até 13:00 h. ^c 17:00 h até 18:00 h (crepúsculo vespertino).

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 9 mostra que o concreto, areia e o metal apresentaram os maiores valores (médias) de temperatura superficial no período da tarde, entretanto, enquanto a grama e a pedra mineira possuem menor temperatura no mesmo período. Vale ressaltar que a pedra mineira obteve menor amplitude térmica média entre os períodos analisados, conferindo um grande potencial relacionado à questão do conforto térmico.

A maior temperatura superficial alcançada foi de 60,7 °C para a escada metálica e o valor mínimo atingiu 26,1 °C para o elemento grama, sendo possível ver que tanto o concreto como a areia também apresentaram desempenhos térmicos desfavoráveis e semelhantes (59,4 °C e 59,3 °C) considerando a temperatura máxima alcançada (Tabela 9). No período da manhã a areia obteve o pior desempenho térmico com diferença de temperatura superficial (média) de 5,7 °C em relação à pedra mineira, que se caracteriza como material de melhor potencial térmico.

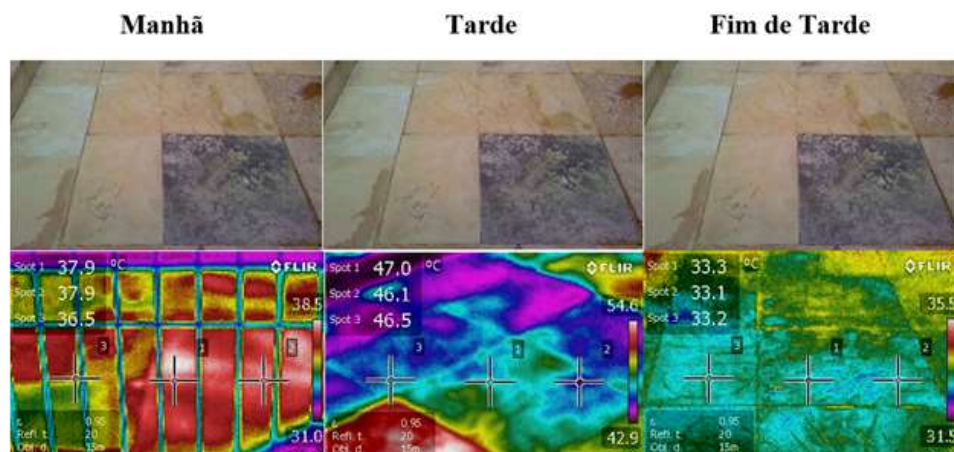
Em geral, os valores encontrados indicam que a utilização de grama é propícia para a composição de pisos no ambiente externo em detrimento ao concreto e a areia, pois oferece característica térmica superficial mais amena, atingindo diferenças de temperaturas (médias) de

até 9,7 °C no período da tarde com relação aos demais elementos. Ademais, a grama também pode contribuir com a questão da infiltração de água de origem pluvial, evitando possíveis transtornos com o sistema de drenagem causado pela utilização do concreto e a lixiviação do solo.

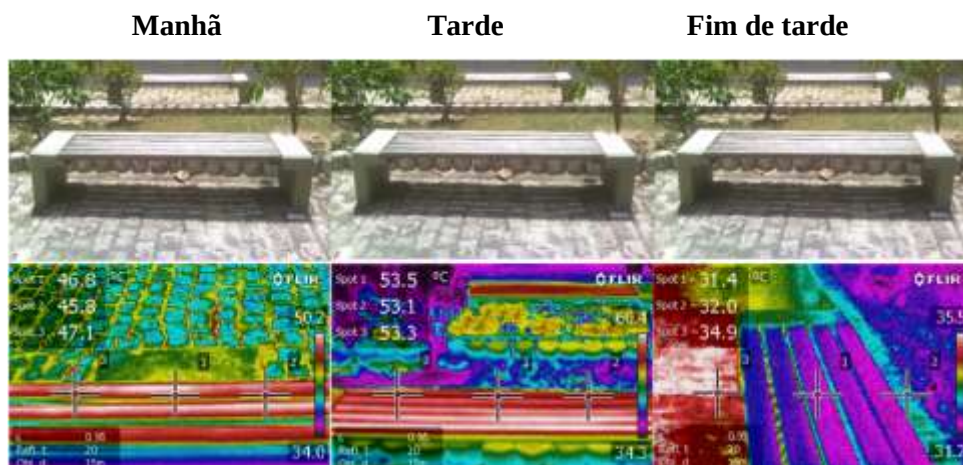
A Figura 19 apresenta os registros térmicos máximos dos elementos construtivos no período do estudo na área selecionada.

Figura 19 – Imagens termográficas da temperatura superficial máxima dos materiais selecionados presentes na área em estudo na cidade de Fortaleza, Ceará.

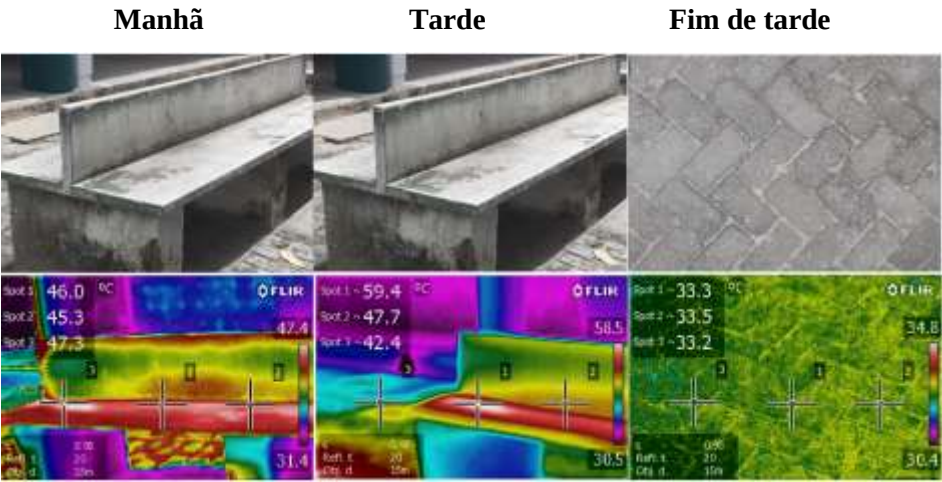
a) Piso em pedra mineira



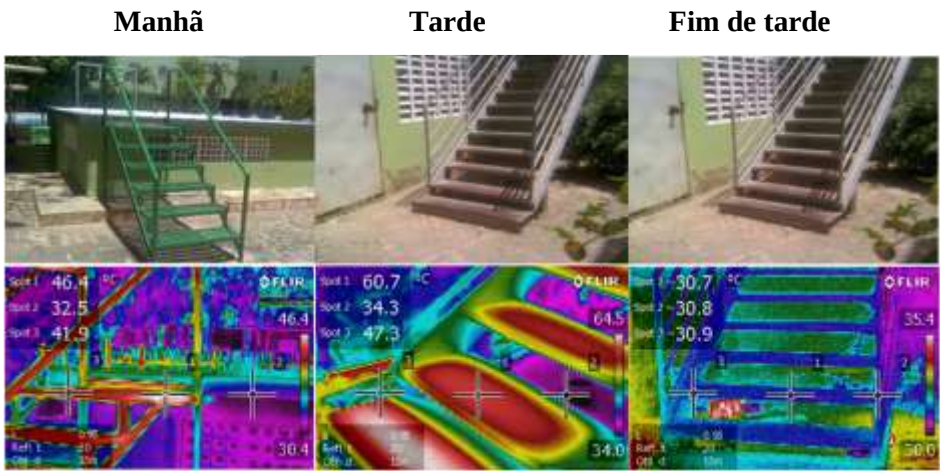
b) Banco em madeira



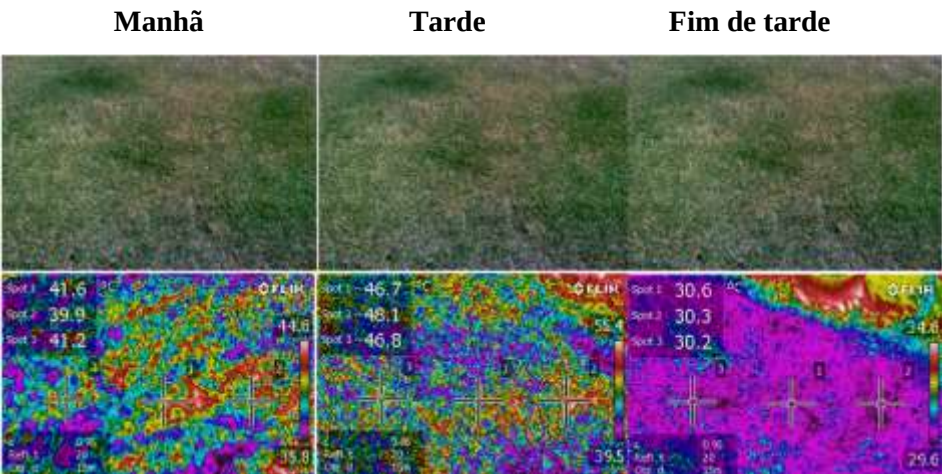
b) Banco e piso em concreto



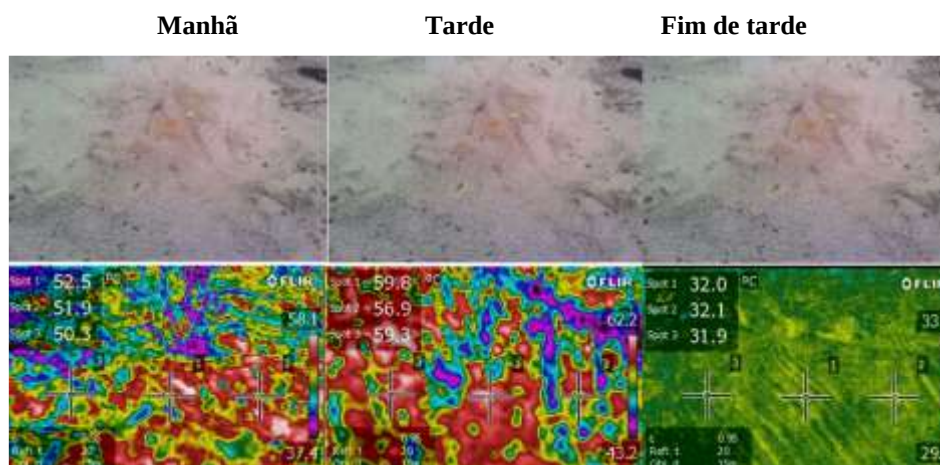
c) Estrutura metálica



d) Grama



e) Solo (areia)



Fonte: Autor (2022).

A Figura 19 mostra a temperatura superficial máxima dos elementos analisados, sendo que os materiais como o metal, concreto e areia alcançaram níveis térmicos superiores aos demais, com o metal obtendo o pior desempenho no período da tarde. No entanto, no turno da manhã a areia atingiu um valor máximo variando entre 50,3 °C a 52,5 °C, sendo que a grama obteve níveis oscilando entre 39,9 °C a 41,6 °C o que representa uma diferença térmica acentuada entre os dois materiais. No fim da tarde as imagens térmicas apresentaram valores máximos próximos para os diferentes materiais em análise, apresentando variação de 3,3 °C.

Neves *et al.* (2019) realizaram um estudo termográfico em uma praça localizada na cidade de Fortaleza, observando a temperatura superficial dos materiais presentes neste local. Os autores observaram que o piso de concreto e asfalto foram os materiais que obtiveram as piores performances térmicas no período da tarde, com valores registrados de 47,8 °C e 50,2 °C, respectivamente. O banco de madeira obteve a menor temperatura superficial de 38,3 °C entre os elementos analisados. Em relação ao atual estudo, tem-se que os registros efetuados na praça possuem diferenças expressivas de temperatura, porém, no caso praça as medições foram executadas no período chuvoso (mês de fevereiro), o que pode ter amenizado os níveis térmicos.

Machado, Lima e Silva (2015) efetuaram medições de temperatura de superfície em elementos construtivos presentes na região central de Feira de Santana, Bahia no mês de fevereiro no período da tarde, obtendo valores para o concreto e grama de 40,1 °C e 25,9 °C, respectivamente. Em comparação a pesquisa atual, observam-se temperaturas mais amena, no entanto, o período chuvoso pode ter mitigado os níveis de radiação térmica a que tais elementos estavam expostos.

6 CONCLUSÕES

Em geral, os valores médios das concentrações dos poluentes monitorados na área em estudo durante as campanhas realizadas mostraram-se dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira, europeia e americana, confirmando a boa qualidade do ar na área do trecho urbano na cidade de Fortaleza. Os valores de IQAr para os poluentes contemplados nesta pesquisa mostram que a área em estudo possui qualidade do ar classificada como boa na maioria dos dias avaliados.

Os níveis de PTS ficaram muito abaixo dos valores limites estabelecidos pela CONAMA 491/18 e as concentrações de MP_{10} permaneceram baixas ultrapassando apenas em uma coleta o limite mais restrito pertencente a OMS. O $MP_{2,5}$ apresentou maior nível de desconformidade entre os particulados analisados com apenas três coletas se adequando ao valor limite indicado pela OMS. Esse decréscimo na concentração de partículas em comparação aos estudos de qualidade do ar realizados em 2013 e 2014 na cidade de Fortaleza pode ser atribuído em uma primeira instância a menor atividade urbana decorrente das restrições impostas pela pandemia de COVID-19.

Notadamente quando se aplica uma abordagem mais restritiva comparando os resultados encontrados aos padrões da Organização Mundial da Saúde para partículas inaláveis finas, os níveis de $MP_{2,5}$ encontram-se desconformidade, caracterizando um problema ambiental que requer a atuação dos órgãos reguladores para sua mitigação ou eliminação.

Em relação as concentrações de O_3 todas as medições mantiveram-se abaixo dos limites estabelecidos pelas legislações brasileira, americana, europeia e da OMS e os valores médios de CO_2 e COVT para o período de monitoramento também se apresentaram dentro dos limites de segurança relacionados ao bem-estar e conforto humano, o que confirma a boa qualidade do ar quando se consideram os gases inorgânicos e compostos voláteis no ar local.

A avaliação dos níveis de conforto térmico realizada a partir dos índices IDT e IC mostraram um ambiente geralmente desconfortável com o nível de calor apresentando um grau de “cautela extrema” na maioria dos dias avaliados. No entanto, o índice TEv mostrou que uma fração expressiva das coletas (55%) do ambiente apresentou uma sensação térmica confortável.

Com relação as temperaturas de superfície dos elementos presentes na área de estudo, observou-se que a pedra mineira e a grama ofereceram melhores desempenhos térmicos superficiais em comparação aos demais materiais nos períodos da manhã e tarde.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9547: Material particulado em suspensão no ar ambiente - Determinação da concentração total pelo método do amostrador de grande volume.** Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13412: Material em suspensão na atmosfera - Determinação da concentração de partículas inaláveis pelo método do amostrador de grande volume acoplado a um separador inercial de partículas.** Rio de Janeiro, 1995.
- ALEXANDRINO, K.; VITERI, F.; RYBARCZYK, Y. ANDINO, J. E. G.; ZALAKEVICIUTE, R. Biomonitoring of metal levels in urban areas with different vehicular traffic intensity by using Araucaria heterophylla needles. **Ecological Indicators**, v. 117, p. 01-11, 2020.
- ANDREÃO, W. L.; ALBUQUERQUE, T. A. T.; KUMAR, P. Excess deaths associated with fine particulate matter in Brazilian cities. **Atmospheric Environment**, v. 194, p. 71-81, 2018.
- ANDREÃO, W. L.; PINTO, J. A.; PEDRUZZI, R.; KUMAR, P.; ALBUQUERQUE, T. T. A. Quantifying the impact of particle matter on mortality and hospitalizations in four Brazilian metropolitan areas. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 01-14, 2020.
- APERGIS, N.; GUPTA, R.; LAU, C. K. M.; MUKHERJEE, Z. U.S. state-level carbon dioxide emissions: Does it affect health care expenditure? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 521-530, 2018.
- ARAÚJO, A. M.; SARAIVA, A. L. B. C.; GRÍGIO, A. M. Conforto térmico humano: um estudo de caso em três praças públicas do bairro Centro, Mossoró (RN). **Revista GeoInterações**, v. 1, n. 2, p. 31-50, 2017.
- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** 2020. Disponível em: <<https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines>>
- AZEVEDO, J. A. H. **Monitoramento atmosférico de material particulado, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e metais em um trecho urbano da cidade de Fortaleza.** 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2014.
- AZEVEDO, P. V.; BEZERRA, P. T. C.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; SANTOS, C. A. C. Thermal comfort level assessment in urban area of Petrolina-PE County, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 555-563, 2017.
- BAIRD, C. **Química ambiental.** 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2002, 622 p.
- BALAKRISHNAN, K.; DEY, S.; GUPTA, T.; DHALIWAL, R. S.; BRAUER, M.; COHEN, A. J., *et al.* The impact of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across the states of India: The Global Burden of Disease Study 2017. **The Lancet Planetary Health**, v. 3, n. 1, p. 26-39, 2019.

BARBOZA, E. N.; CAIANA, C. R. A.; NETO, F. C. B.; MAIA, A. G.; LIMA, C. J.; MARACAJÁ, P. B. Análise do índice de calor (IC), índice de conforto térmico (IDT) e índice de temperatura e umidade (ITU) na cidade de Iguatu/CE a partir de dados históricos. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 38-44, 2019.

BERINGUI, K. *et al.* Assessment of air quality changes during COVID-19 partial lockdown in a Brazilian metropolis: from lockdown to economic opening of Rio de Janeiro, Brazil. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 15, p. 1205-1220, 2022.

BERNARDINO, A. A. N. **Desempenho Térmico de Revestimentos de Cobertura utilizando a Técnica da Termografia**. 2018. 68 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2018.

BIAGIOTTI, N. **Câmera Termográfica como ferramenta de caracterização do comportamento térmico de fachadas**. 2021. 140 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

BIGAZZI, A. Y.; FIGLIOZZI, M. A.; CLIFTON, K. J. Traffic congestion and air pollution exposure for motorists: Comparing exposure duration and intensity. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 9, n. 7, p. 443-456, 2015.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Dados Históricos Anuais**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 03 de jan. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 491**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/guest/materia//asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603178>. Acesso em: 8 de nov. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar**. Brasília, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/mma-guia-tecnico-qualidade-do-ar-pdf>>. Acesso em: 10 de set. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução nº 9 de 16 de janeiro de 2003**. Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Brasília, 2003. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2003/rdc0009_16_01_2003.html> Acesso em: 4 de jul. 2022.

BREUER, J. L.; SAMSUN, R. C.; STOLTEN, D.; PETERS, R. How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks. **Environment International**, v. 152, p. 01-17, 2021.

BRITO, P. H. F. **Caracterização da fração inorgânica associada ao material particulado atmosférico inalável em um trecho urbano da cidade de Fortaleza.** 2018. 74f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2018.

CAI, B.; GUO, H.; CAO, L.; GUAN, D.; BAI, H. Local strategies for China's carbon mitigation: An investigation of Chinese city-level CO₂ emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 890-902, 2018a.

CAI, W.; HUI, J.; WANG, C.; ZHENG, Y.; ZHANG, X.; ZHANG, Q.; GONG, P. Countdown on PM_{2.5} pollution-related health impacts of China's projected carbon dioxide mitigation in the electric power generation sector under the Paris Agreement: a modelling study. **The Lancet Planetary Health**, v. 2, p. 151-161, 2018b.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações.** Tradução. [s.l.] Artmed Editora, 2009.

ÇAPRAZ, Ö.; DENİZ, A. Assessment of hospitalizations from asthma, chronic obstructive pulmonary disease and acute bronchitis in relation to air pollution in İstanbul, Turkey. **Sustainable Cities and Society**, v. 72, p. 01-09, 2021.

CARVALHO, T. A. M. **Conforto Ambiental: Térmico.** 1.ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional, 2018, 200 p.

CETESB(a). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo. **Ficha de Informação Toxicológica. Dióxido de enxofre.** São Paulo, 2021. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/07/Dio%CC%81xido-de-enxofre.pdf>>. Acesso em: 6 de abr. 2022.

CETESB(b). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2020.** Série Relatórios. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>>. Acesso em: 4 de abr. 2022.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo. **Padrões de Qualidade do Ar.** São Paulo, 2013. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/#:~:text=O%20%C3%ADndice%20de%20qualidade%20do,longa%20experi%C3%Aancia%20desenvolvida%20nos%20EUA.>> Acesso em: 4 de mai. 2022.

COELHO, S.; RAFAEL, S.; LOPES, D.; MIRANDA, A. I.; FERREIRA, J. How changing climate may influence air pollution control strategies for 2030?. **Science of The Total Environment**, v. 758, p. 01-09, 2021.

DERISIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental.** 3.ed. São Paulo: Signus, 2007. 192 p.

DERISIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental.** 4.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 228 p.

DIAS, M. A. F. S.; SILVA, M. G. A. J. Para entender tempo e clima. In: Cavalcanti, I. F. A. *et al.* (org.). **Tempo e clima no Brasil**. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, 464 p.

EC. European Commission. **Directive 2008/50/EC**. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0050>>. Acesso em: 10 de nov. 2021.

ENGER, E. D.; SMITH, B. F. **Ciencia ambiental**: Un studio de interrelaciones. 10.ed. México: McGraw-Hill, 2006, 476 p.

EPA. United States Environmental Protection Agency. **Compendium method IO-2.1 - Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (SPM) and PM10 using high volume (HV) sampler**. In: EPA. Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air. EPA/625/R-96/010a. Cincinnati, 1999.

EPA. United States Environmental Protection Agency. **Guidelines for the reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)**. EUA, 2006. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/caaa/t1/memoranda/rg701.pdf>>. Acesso em: 4 de mai. 2022.

EPA. United States Environment Protection Agency. **National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)**. EUA, 2015. Disponível em: <<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>>, Acesso em: 20 de out. 2021.

FERREIRA, L. S. **Vegetação, temperatura de superfície e morfologia urbana: um retrato da região metropolitana de São Paulo**. 2019. 195 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 8.ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003. 243 p.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 248 p.

GATELY, C. K.; HUTYRA, L. R.; PETERSON, S.; WING, I. S. Urban emissions hotspots: Quantifying vehicle congestion and air pollution using mobile phone GPS data. **Environmental Pollution**, v. 229, p. 496-504, 2017.

GHAFFARIANHOSEINI, A.; BERARDI, U.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; AL-OBAIDI, K. Analyzing the thermal comfort conditions of outdoor spaces in a university campus in Kuala Lumpur, Malaysia. **Science of The Total Environment**, v. 666, p. 1327-1345, 2019.

GOEDERT, J. **Avaliação do Conforto Térmico em Postos de Trabalho de Motoristas de Ônibus**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção - Ênfase Ergonomia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

GOMES, C.; SILVA, M. L.; SILVA, A. C. Monitoramento da qualidade do ar e conforto ambiental urbano da avenida Treze de Maio em Fortaleza, Ceará. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 22589-22602, 2019.

GOUVEIA, N.; JUNGER, W. L. Effects of air pollution on infant and children respiratory mortality in four large Latin-American cities. **Environmental Pollution**, v. 232, p. 385-391, 2018.

GOYAL, R.; KHARE, M. Indoor air pollution and health effects. *In*: GURJAR, B. R.; MOLINA, L. T.; OJHA, C. S. P. (ed.) **Air Pollution - Health and Environmental Impacts**. 1.ed. Boca Raton, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010, 544 p.

HASHIM, B. M.; AL-NASERI, S. K.; AL-MALI, A.; AL-ANSARI, N. Impact of COVID-19 lockdown on NO₂, O₃, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations and assessing air quality changes in Baghdad, Iraq. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 01-10, 2021.

HONG, C.; YANG, Y.; GE, S.; CHAI, G.; ZHAO, P.; SHUI, Q.; GU, Z. Is the design guidance of color and material for urban buildings a good choice in terms of thermal performance?. **Sustainable Cities and Society**, v. 83, p. 1-11, 2022.

IAP. Instituto Ambiental do Paraná. **Relatório Anual da Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Curitiba**: Ano de 2012. Paraná, 2012. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-08/relatorio_qualidade_do_ar_anual_iap_2012.pdf> Acesso: 21 de abr. 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. 2021

JEPHCOTE, C.; HANSELL, A. L.; ADAMS, K. GULLIVER, J. Changes in air quality during COVID-19 'lockdown' in the United Kingdom. **Environmental Pollution**, v. 272, p. 116011, 2021.

JÚNIOR, A. C. F. **Avaliação da qualidade do ar no município de São Gonçalo do Amarante/CE**. 2016. 82f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2016.

KARIMI, B.; SHOKRINEZHAD, B.; SAMADI S. Mortality and hospitalizations due to cardiovascular and respiratory diseases associated with air pollution in Iran: A systematic review and meta-analysis. **Atmospheric environment**, v. 198, p. 438-447, 2019.

KARIMI, B.; SHOKRINEZHAD, B. Air pollution and the number of daily deaths due to respiratory causes in Tehran. **Atmospheric Environment**, v. 246, p. 01-09, 2021.

KIM, M. K.; CHOI, J. H. Can increased outdoor CO₂ concentrations impact on the ventilation and energy in buildings? A case study in Shanghai, China. **Atmospheric Environment**, v. 210, p. 220-230, 2019.

KRECL, P.; CIPOLI, Y. A.; TARGINO, A. C.; CASTRO, L. B.; GIDHAGEN, L.; MALUCELLI, F.; WOLF, A. Cyclists' exposure to air pollution under different traffic management strategies. **Science of The Total Environment**, v. 723, p. 01-11, 2020.

LACAVA, C. I. V. Avaliação da qualidade do ar. In: ÁLVARES JUNIOR, O. de M.; LACAVA, C. I. V.; FERNANDES, P. S. **Emissões atmosféricas**. 1.ed. Brasília, DF: SENAI/DN, 2002. 373 p.

LEE C. C.; TRAN, M.; CHOO, C. W.; TAN, C. P.; CHIEW, Y. S. Evaluation of air quality in Sunway City, Selangor, Malaysia from a mobile monitoring campaign using air pollution micro-sensors. **Environmental Pollution**, v. 265, p. 1-11, 2020.

LEIRIÃO, L. F. L.; MIRAGLIA, S. G. E. K. Environmental and health impacts due to the violation of Brazilian emissions control program standards in Sao Paulo Metropolitan Area. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 70, p. 70-76, 2019.

LEITE, R. C. V. **Cidade, vento, energia: limites de aplicação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido**. 2015. 273 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

LI, B.; HO, S. S. H.; LI, X.; GUO, L.; FENG, R.; FANG, X. Pioneering observation of atmospheric volatile organic compounds in Hangzhou in eastern China and implications for upcoming 2022 Asian Games. **Journal of Environmental Sciences**, v. 124, p. 723-734, 2023.

LIMA, D. C. R. **Forma e arborização em cânions urbanos: tendências de estresse térmico para o pedestre em cenários futuros de Umuarama/PR**. 2018. 251 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

LIMA, J. R. **Avaliação da Poluição Atmosférica na área do distrito industrial de Maracanaú, Ceará, Brasil, nos anos de 2015-2016**. 2017. 109 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2017.

LIMA, R. M. **Avaliação da qualidade do ar em um trecho urbano da cidade de Fortaleza – Ceará**. 2015. 109 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2015.

LI, P.; LU, Y.; WANG, J. The effects of fuel standards on air pollution: Evidence from China. **Journal of Development Economics**, v. 146, p. 01-19, 2020.

LY, B-T.; KAJII, Y.; NGUYEN, T-Y-L.; SHOJI, K.; VAN, D-A.; DO, T-N-N.; NGHIEM, T-D.; SAKAMOTO, Y. Characteristics of roadside volatile organic compounds in an urban area dominated by gasoline vehicles, a case study in Hanoi. **Chemosphere**, v. 254, p. 1-13, 2020.

MAATOUG, M., TAÏBI, K., AKERMI, A., ACHIR, M., MESTRARI, M. Bio-Monitoring of Air Quality Using Leaves of Tree and Lichens in Urban Environments. In: KHARE, M. (ed.) **Air Pollution - Monitoring, Modelling and Health**. 1.ed. London: IntechOpen, 2012, 398 p.

MACHADO, R. A. S.; LIMA, L. B.; SILVA, M. P. C. Indicadores ambientais urbanos: análise das ilhas de calor, concentração de CO₂ e níveis de ruído no centro de Feira de Santana – Bahia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015. **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015. p. 888-894.

MARÇAL, N. A.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SANTOS, J. S. Analysis of the environmental thermal comfort conditions in public squares in the semiarid region of northeastern Brazil. **Building and Environment**, v. 152, p. 145-159, 2019.

MARQUES, E. V.; ROCHA, C. A.; DOS SANTOS, R. P.; RAMOS, F. C. L.; LIMA, J. L. R.; CATTONY, C. M.; SILVA, M. V. C.; ZANELLA, M. E.; CAVALCANTE, R. M. Influência da arborização e da edificação na dispersão de material particulado respirável em cidade costeira altamente urbanizada (Fortaleza, CE-Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 913-929, 2019.

MASTER. Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais. **Distribuição das zonas de conforto para diferentes graus de percepção térmica e suas respostas fisiológicas**. Disponível em: <<https://url.gratis/6Relx>>. Acesso em: 10 de dez. 2021.

MARTIN, M.; CHONG, A.; BILJECKI, F.; MILLER, C. Infrared thermography in the built environment: A multi-scale review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 165, p. 1-22, 2022.

MEHROTRA, S.; SUBRAMANIAN, D.; BARDHAN, R.; JANA, A. Effect of surface treatment and built form on thermal profile of open spaces: A case of Mumbai, India. **Urban Climate**, v. 35, p. 01-09, 2021.

MENDES, T. G. L.; NASCIMENTO, P. T. B.; BEZERRA, J. M.; ANJOS, L. S. A.; NÓBREGA, R. S. Avaliação de índices de conforto térmico ambiental nos bairros de Recife - Pernambuco (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 4, n.1, p. 136-147, 2018.

MELE, M.; MAGAZZINO, C. A Machine Learning analysis of the relationship among iron and steel industries, air pollution, and economic growth in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 01-12, 2020.

MELO, A. P. S. S.; FREITAS, R. F. M. Contribuições dos parâmetros urbanísticos para o urbanismo bioclimático. Pós. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, v. 27, n. 51, p. 01-21, 2020.

MUNIZ, F. G. L.; CARACRISTI, I. As Transformações Urbanas e a Sazonalidade: Produtores do Conforto Térmico do Centro da Cidade de Sobral-CE. **Revista geografia Ensino & pesquisa**, v. 22, p. 1-12, 2018.

MUNIZ-GÄAL, L. P.; PEZZUTO, C. C.; CARVALHO, M. F. H.; MOTA, L. T. M. Eficiência térmica de materiais de cobertura. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 503-518, 2018.

NAKADA, L. Y. K.; URBAN, R. C. COVID-19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 730, p. 1-5, 2020.

NABERS. National Australian Built Environment Rating System. **Ruling: Indoor Air Quality calculations**. 2018. Disponível em: <<https://www.nabers.gov.au/publications/nabers-indoor-environment-offices-rules>> Acesso em: 5 de jul. 2022.

NASCIMENTO, R. C.; SILVA, J. B. S.; VACONCELOS, T. L.; FRANÇA, R. S. Variabilidade espacial de parâmetros meteorológicos e do conforto térmico em recorte urbano com diferentes configurações paisagísticas, Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 1, p. 9-21, 2019.

NEVES, C. J. T.; SILVA, M. L.; MARQUES, S. G. F.; SÁ, G. G.; SILVA, A. C. Avaliação de indicadores ambientais urbanos em um espaço público da cidade de Fortaleza-CE. **Revista Tecnologia**, v. 40, n. 2, p. 1-17, 2019.

NÓBREGA, R. S.; LEMOS, T. V. S. O Microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 28, n. 1, p. 93-109, 2011.

NODA, L.; NÓBREGA, A. B. E. Q.; DA SILVA JÚNIOR, J. B. M. et al. COVID-19: Has social isolation reduced the emission of pollutants in the megacity of São Paulo-Brazil?. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, p. 12233-12251, 2021.

NOVAES, G. B. A. **Impactos da morfologia da cidade nas condições microclimáticas de áreas urbanas consolidadas de São Paulo em dias quentes**. 2020. 332 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

NOVAIS, J. W. Z.; MARQUES, A. C. A.; SIQUEIRA, A. Y.; REIS, N. M. S.; JOAQUIM, T. D.; PEREIRA, S. P. Índice de temperatura e umidade (ITU) visando o conforto térmico para o Parque Mãe Bonifácia, Cuiabá-MT. **Ensaio e Ciência**, v. 22, n. 2, p. 69-75, 2018.

PAIVA, J. P. M. **Clima e Ambiente construído: O Caso dos conjuntos habitacionais de Fortaleza/CE**. 2018. 277 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

PÉREZ-MARTÍNEZ, P. J.; ANDRADE, M. F.; MIRANDA, R. M. Heavy truck restrictions and air quality implications in São Paulo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 202, p. 55-68, 2017.

OJI, S.; ADAMU, H. Correlation between air pollutants concentration and meteorological factors on seasonal air quality variation. **Journal of Air Pollution and Health**, v. 5, n. 1, p. 1-32, 2020.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban Climates**. 1.ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2017, 546 p.

PORTAL G1. Osório de Paiva, Raul Barbosa e Aguanambi são as avenidas com o maior fluxo de veículos em Fortaleza. 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2022/08/04/osorio-de-paiva-raul-barbosa-e-aguanambi-sao-as-avenidas-com-o-maior-fluxo-de-veiculos-em-fortaleza.ghtml>> Acesso em: 5 de set. 2022.

RATHOD, A.; SAHU, S. K.; SINGH, S.; BEIG, G. Anomalous behaviour of ozone under COVID-19 and explicit diagnosis of O₃-NO_x-VOCs mechanism. **Heliyon**, v. 7, n. 2, p. 01-07, 2021.

REQUIA, W. J.; HIGGINS, C. D.; ADAMS, M. D.; MOHAMED, M.; KOUTRAKIS, P. The health impacts of weekday traffic: A health risk assessment of PM_{2.5} emissions during congested periods. **Environment International**, v. 111, p. 164-176, 2018.

ROCHA, C. A.; MARQUES, E. V.; SANTOS, R. P.; SANTIAGO, Í. S.; CAVALCANTE, C. L.; CASSIANO, D. R.; RIBEIRO, J. P.; BERTONCINI, B. V.; NOBRE, J. S.; FREITAS, J. V. B.; FERREIRA, A. G.; CAVALCANTE, R. M. A better understanding of air quality resulting from the effects of the 2020 pandemic in a city in the equatorial region (Fortaleza, Brazil). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 14, p. 20921-20938, 2022.

ROMERO, M. A. B.; BAPTISTA, G. M. M.; LIMA, E. A.; WERNECK, D. R.; VIANNA, E. O.; SALES, G. L. **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. 1.ed. Brasília: Editora ETB, 2019. 151 p.

ROTHFUSZ, L. P. The heat index “equation” or more than you ever wanted to know about heat index: national weather service southern region technical attachment SR/SSD 90-23, **National Weather Service**, p. 1-2, 1990.

RYSWYK, K. V.; PRINCE, N.; AHMED, M.; BRISSON, E.; MILLER, J. D.; VILLENEUVE, P. J. Does urban vegetation reduce temperature and air pollution concentrations? Findings from an environmental monitoring study of the Central Experimental Farm in Ottawa, Canada. **Atmospheric Environment**, v. 218, p. 1-10, 2019.

SANCHEZ, E.Y.; PORTA, A. Composición química de la atmosfera. In: PORTA, A.; SANCHEZ, E.Y.; LERNER, E. C. (org.) **Calidad del aire: Monitoreo y modelado de contaminantes atmosféricos. Efectos en la salud pública**. 1.ed. Buenos Aires, Argentina: EDULP, 2018, 303 p.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar energy**, v. 85, n. 12, p. 3085-3102, 2011.

SANTOS, G. P.; ALMEIDA, R. M.; MOURA, E. R. S.; OLIVEIRA, L. L. Sensação térmica urbana em área residencial planejada no município de Santarém – Pará, Amazônia, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1333-1351, 2021.

SANTOS, G. P.; OLIVEIRA, L. L.; SILVA, J. A. C.; BARRETO, N. J. C.; ALMEIDA, R. M. Desconforto térmico durante a estação seca em uma cidade de clima tropical chuvoso na Amazônia. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 6, p. 169-179, 2018.

SANTOS, J. S.; SILVA, V. P. R.; SILVA, E. R.; ARAÚJO, L. E.; COSTA, A. D. L. Campo térmico urbano e a sua relação com o uso e cobertura do solo em cidade tropical úmida. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, p. 540-557, 2012.

SARRA, S. R.; MÜLFARTH, R. C. K. Os impactos da epidemia do novo coronavírus sobre os níveis de poluentes no município de São Paulo. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 40415-40438, 2021.

SAXENA, A.; RAJ, S. Impact of lockdown during COVID-19 pandemic on the air quality of North Indian cities. **Urban Climate**, v. 35, p. 1-13, 2021.

SCHIBUOLA, L.; TAMBANI, C. Indoor environmental quality classification of school environments by monitoring PM and CO₂ concentration levels. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 2, p. 332-342, 2020.

SELMI, W.; WEBER, C.; RIVIÈRE, E.; BLOND, N.; MEHDI, L.; NOWAK, D. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 17, p. 192-201, 2016.

SEMACE. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. **Relatório de desempenho da gestão 2020**. 2020. Disponível em: <<https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2021/05/Relatorio-de-Desempenho-da-Gestao-2020.pdf>> Acesso em: 12 de abr. 2022.

SHEN, Y.; WU, Y.; CHEN, G.; GRINSVEN, H. J. M. V.; WANG, X.; GU, B.; LOU, X. Non-linear increase of respiratory diseases and their costs under severe air pollution. **Environmental Pollution**, v. 224, p. 631-637, 2017.

SOUSA, A. P. **Quantificação dos níveis de black carbon, fumaça negra, NO₂ e O₃ no campus Itaperi da Universidade Estadual do Ceará**. 2019. 83f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2019.

SOUSA, N. A. **Determinação de material particulado em um corredor de trânsito e modelagem da deposição no sistema respiratório: estudo de caso em Fortaleza – CE**. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2017.

SPEAK, A.; MONTAGNANI, L.; WELLSTEIN, C.; ZERBE, S. Forehead temperatures as an indicator of outdoor thermal comfort and the influence of tree shade. **Urban Climate**, v. 39, p. 01-14, 2021.

SUPING, Z.; GUANGLIN, M.; YANWEN, W.; JI, L. Study of the relationships between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distance runners. **International Journal of Biometeorology**, v. 36, p. 63-68, 1992.

TALBI, A.; KERCHICH, Y.; KERBACHI, R.; BOUGHEDAOU, M. Assessment of annual air pollution levels with PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and associated heavy metals in Algiers, Algeria. **Environmental Pollution**, v. 232, p. 252-263, 2018.

TELLO-LEAL, E.; MACÍAS-HERNÁNDEZ, B. A. Association of environmental and meteorological factors on the spread of COVID-19 in Victoria, Mexico, and air quality during the lockdown. **Environmental Research**, v. 196, p. 1-7, 2021.

THOM, E. C. The discomfort index. **Weatherwise**, v. 12, p. 57-61, 1959.

TISCHER, V.; FOUNTAS, G.; POLETTE, M.; RYE, T. Environmental and economic assessment of traffic-related air pollution using aggregate spatial information: A case study of balneário Camboriú, Brazil. **Journal of Transport & Health**, v. 14, p. 1-21, 2019.

TORO, R. A.; CATALÁN, F.; URDANIVIA, F. R.; ROJAS, J. P.; MANZANO, C. A.; SEGUEL, R.; GALLARDO, L.; OSSES, M.; PANTOJA, N.; LEIVA-GUZMAN, M. A. Air pollution and COVID-19 lockdown in a large South American city: Santiago Metropolitan Area, Chile. **Urban Climate**, v. 36, p. 1-13, 2021.

UBA. German Federal Environmental Agency (Deutsches Umweltbundesamt). **Indoor air guide values for TVOC in indoor air**. 2007. Disponível em: <<https://www.umweltbundesamt.de/en/image/indoor-air-guide-values-for-tvoc-in-indoor-air>> Acesso em: 5 de jul. 2022.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M. **Introdução à engenharia ambiental**. 2.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011, 438 p.

VORMITTAG, E. M. P. A. A.; CIRQUEIRA, S. S. R.; WICHER NETO, H.; SALDIVA, P. H. N. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 35, n. 102, p. 7-30, 2021.

WANG, T.; ZHAO, B.; LIOU, K.; GU, Y.; JIANG, Z.; SONG, K.; SU, H.; JERRETT, M.; ZHU, Y. Mortality burdens in California due to air pollution attributable to local and nonlocal emissions. **Environment International**, v. 133, p. 1-9, 2019.

WEN, Y.; ZHANG, S.; ZHANG, J.; BAO, S.; WU, X.; YANG, D.; WU, Y. Mapping dynamic road emissions for a megacity by using open-access traffic congestion index data. **Applied Energy**, v. 260, p. 1-9, 2020a.

WEN, W.; MA, X.; TANG, Y.; WEI, P.; WANG, J.; GUO, C. The impacts of meteorology on source contributions of air pollution in winter in Beijing, 2015-2017 changes. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 11, p. 1953-1962, 2020b.

WHO. World Health Organization. **WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. 2005. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/107823/9789289021920-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso: 11 de abr. 2022.

WHO. World Health Organization. **WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. 2021. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>> Acesso: 17 de nov. 2021.

WHO. World Health Organization. **Burden of disease from ambient air pollution for 2016, version 2**. 2018. Disponível em: <https://www.who.int/airpollution/data/AAP_BoD_results_May2018_final.pdf?ua=1> Acesso: 25 de nov. 2021.

YNOUE, R. Y. *et al.* **Meteorologia: Noções básicas**. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017, 184 p.

YU, C.; KANG, J.; TENG, J.; LONG, H.; FU, Y. Does coal-to-gas policy reduce air pollution? Evidence from a quasi-natural experiment in China. **Science of the Total Environment**, v. 773, p. 1-21, 2021.

ZAMAN, S. U.; YESMIN, M.; PAVEL, M. R. S.; JEBA, F.; SALAM, A. Indoor air quality indicators and toxicity potential at the hospitals' environment in Dhaka, Bangladesh. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 37727-37740, 2021.

ZHANG, Y. Dynamic effect analysis of meteorological conditions on air pollution: A case study from Beijing. **Science of the Total Environment**, v. 684, p. 178-185, 2019.

ZHANG, Y.; ZHANG, L.; WEI, J.; LIU, L.; WANG, Y.; LIU, J.; ZHOU, P.; WANG, L.; DING, Z.; ZHANG, Y. Size-specific particulate air pollution and hospitalization for cardiovascular diseases: A case-crossover study in Shenzhen, China. **Atmospheric Environment**, v. 251, p. 1-9, 2021.

ZORAN, M. A.; SAVASTRU, R. S.; SAVASTRU, D. M.; TAUTAN, M. N. Assessing the relationship between surface levels of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. **Science of The Total Environment**, v. 738, p. 1-12, 2020.