

UNIVERSIDADE VILA VELHA - ES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E CIDADE

**QUALIDADE DO AR INTERNO EM SALAS DE AULA NATURALMENTE
VENTILADAS DURANTE A PANDEMIA DE COVID-19**

SAULO VIEIRA DE OLIVEIRA SILVA

VILA VELHA
JUNHO / 2022

UNIVERSIDADE VILA VELHA - ES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E CIDADE

**QUALIDADE DO AR INTERNO EM SALAS DE AULA NATURALMENTE
VENTILADAS DURANTE A PANDEMIA DE COVID-19**

Dissertação apresentada a Universidade
Vila Velha, como pré-requisito do
Programa de Pós-graduação em
Arquitetura e Cidade, para a obtenção do
grau de Mestre em Arquitetura e Cidade

SAULO VIEIRA DE OLIVEIRA SILVA

VILA VELHA
JUNHO / 2022

Catálogo na publicação elaborada pela Biblioteca Central / UVV-ES

S586q Silva, Saulo Vieira de Oliveira.
Qualidade do ar interno em salas de aula naturalmente
ventiladas durante a pandemia de COVID-19 / Saulo Vieira de
Oliveira Silva. – 2022.
185 f. : il.

Orientadora: Érica Coelho Pagel.
Dissertação (mestrado em Arquitetura e Cidade) -
Universidade Vila Velha, 2022.
Inclui bibliografias.

1. Arquitetura. 2. Ar - Qualidade. 3. Ventilação. 4. Escolas.
I. Pagel, Érica Coelho. II. Universidade Vila Velha. III. Título.

CDD 720

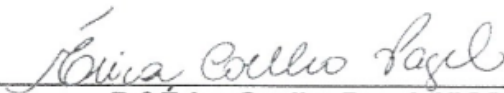
SAULO VIEIRA DE OLIVEIRA SILVA

**QUALIDADE DO AR INTERNO EM SALAS DE AULA NATURALMENTE
VENTILADAS DURANTE A PANDEMIA DE COVID-19**

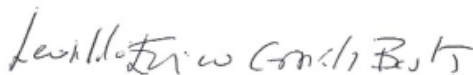
Dissertação apresentada a Universidade
Vila Velha, como pré-requisito do Programa
de Pós-graduação em Arquitetura e Cidade,
para a obtenção do grau de Mestre em
Arquitetura e Cidade

Aprovada em 27 de junho de 2022,

Banca Examinadora:



Drª Érica Coelho Pagel (UVV)
Orientadora



Dr. Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos (UVV)
Examinador Interno

Drª Jane Méri Santos (UFES)
Examinadora Externa



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
JANE MERI SANTOS - SIAPE 1172727
Departamento de Engenharia Ambiental - DEA/CT
Em 09/11/2022 às 10:27

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/600138?tipoArquivo=O>

AGRADECIMENTOS

A Deus, por capacitar com saúde e resiliência, e por abrir as portas nos momentos de dificuldade.

À minha esposa, pelo apoio e companheirismo, e aos meus filhos, pela amizade e momentos de alegria.

À Prof^a. Dr^a. Érica Coelho Pagel pela constante orientação e acompanhamento, que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Arquitetura e Cidade pela oportunidade e aos professores do Mestrado pelas aulas ministradas e sugestões que contribuíram com reflexões interessantes sobre o tema.

Aos Professores Dr. Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos e Dr^a. Jane Méri Santos pelas orientações e opiniões que contribuíram para melhoria deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Ifes, por conceder licença que possibilitou a participação no mestrado, principalmente num contexto de pandemia.

Ao Diretor do Ifes Campus Vitória, o Dr. Hudson Luiz Côgo, pela parceria, acessibilidade e cooperação.

Aos colegas do Ifes, a Prof^a. Flávia Bianchi (Coordenadoria de Edificações), Márcio Có (Diretoria de Ensino) e Kátia Cristina Cabral (Gestão de Pessoas), pela colaboração ao longo de minhas demandas junto ao Ifes.

Aos funcionários da vigilância patrimonial e da recepção do Ifes, pela ajuda na vigia dos equipamentos nos momentos de pausa e almoço.

Aos colegas Marco Hygino e Thaís Gabrieli pela ajuda ao longo do levantamento de campo. Ao professor Dr. Ramon Martins e o Eng. Gustavo pela colaboração.

Ao Prof.^o Dr. Alessandro Sarnaglia e ao colega Felipe Velten, do Laboratório de Estatística da Ufes (LESTAT), pelo apoio na análise dos dados.

Às professoras Heloiza Tozzi e Valéria Fadini pela colaboração nas revisões de língua portuguesa e inglês para o artigo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização à qualidade do ar em salas de aula e a Covid-19	5
1.2 Objetivos	6
1.3 Síntese da metodologia	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 A Qualidade do Ar	8
2.1.1 Poluição atmosférica em áreas urbanas	8
2.1.2 Qualidade do Ar Interior (QAI)	10
2.2 Qualidade do ar em salas de aula	13
2.2.1 Efeitos a saúde	13
2.2.2 Salas de aula naturalmente ventiladas	17
2.2.2.1 Densidade ocupacional.....	20
2.3 Parâmetros e poluentes da QAI	22
2.3.1 Dióxido de carbono - CO ₂	
2.3.1.1 CO ₂ : definições	22
2.3.1.2 CO ₂ : relação com a renovação do ar	26
2.3.1.3 CO ₂ : utilização das aberturas e padrões de ocupação	29
2.3.2 Temperatura do ar e umidade relativa do ar	38
2.3.3 Material Particulado	39
2.3.4 Monóxido de carbono	43
2.4 A doença do Coronavírus de 2019 e o ambiente de ensino	48
2.4.1 Dispersão de partículas contaminadas com o vírus SARS-CoV-2 em ambientes internos	49
2.4.2 Ventilação em salas de aula como medida auxiliar para redução do	

risco de contaminação	52
2.5 Legislação e normas referentes à Qualidade do Ar de Interiores	54
3 METODOLOGIA	59
3.1 Descrição do método	59
3.2 A Região Metropolitana da Grande Vitória	61
3.3 Monitoramento da qualidade do ar na RMGV	64
3.4 O Ifes Campus Vitória	69
3.5 Seleção dos ambientes monitorados	70
3.5.1 Características dos ambientes monitorados	72
3.6 O experimento de campo	75
3.6.1 Registro do comportamento adaptativo e da ocupação das salas de aula	77
3.6.2 Aplicação de questionários	79
3.7 Análise Estatística	79
4 RESULTADOS	81
4.1 Campanha 1: período desocupado	81
4.1.1 Influência da área de abertura das janelas e localização da sala de aula...	81
4.1.2 Influência de eventos externos nas concentrações internas	88
4.2 Campanha 2: período ocupado	92
4.2.1 Influência do uso das aberturas e da ocupação na concentração de MP ...	95
4.2.2 Influência do uso das aberturas e da ocupação na concentração de CO ₂ ...	97
4.2.3 Correlação entre o ambiente externo e interno e as variáveis analisadas...	100
4.2.4 Influência do comportamento adaptativo em relação aos sistemas de ventilação	104
4.2.4.1 Fechamento total de janelas de portas. Uso de ar-condicionado	104
4.2.4.2 Fechamento parcial de janelas porta. Ar-condicionado ligado	107
4.2.4.3 Abertura de janelas e porta. Ar-condicionado desligado	109
4.3 Comparação entre a Campanha 1 e a Campanha 2, considerando a influência da poluição externa nas salas de aula	112
4.4 Percepção do usuário em relação à qualidade do ar	121

4.4.1	Concentração de poluentes momentâneos e a percepção dos usuários	123
4.4.2	Concentração de poluentes ao longo da campanha e a percepção dos usuários	124
4.5	Resultados da melhoria da ventilação frente a pandemia de COVID-19.....	126
5	CONCLUSÕES	127
	REFERÊNCIAS	133
	APÊNDICE A	
	Princípios da fisiologia respiratória e sua relação com a qualidade do ar	160
	APÊNDICE B	
	Origem da Instituição e breve análise da arquitetura do Ifes Campus Vitória	168
	APÊNDICE C	
	Análise Estatística	174
	ANEXO 1	
	Questionários aplicados nas salas de aula em períodos de ocupação	182

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxo de ar pela ventilação cruzada em ambientes sem e com repartições	19
Figura 2	Tipologias sala-corredor-sala (SCS) e sala-corredor (SC)	19
Figura 3	Ilustra a distribuição do volume de ar de uma sala em diferentes densidades de ocupação: a) sala com volume V dividido por três usuários; b) o mesmo volume dividido por 15 usuários.	21
Figura 4	Aumento gradativo da concentração de dióxido de carbono em ambiente interno em função das atividades realizadas pelos estudantes	25
Figura 5	Distribuição em massa e quantidade de partículas tipicamente urbanas, em relação ao diâmetro do material particulado	42
Figura 6	a) Evaporação de partícula contaminada com vírus b) Sistema de forças atuantes na partícula	50
Figura 7	Emissão e dispersão de partículas e sistema de forças	51
Figura 8	Metodologia	60
Figura 9	Localização do Estado do Espírito Santo	61
Figura 10	Mapa com a distribuição das estações RAMQAr e proporção de área urbanizada em cinco dos municípios da RMGV	64
Figura 11	Médias aritméticas anuais de $MP_{2,5}$ em microgramas por metro cúbico	66
Figura 12	Médias aritméticas anuais de MP_{10} em microgramas por metro cúbico	66
Figura 13	Dias desfavoráveis à dispersão de poluentes no ano de 2019, na estação de Carapina	68
Figura 14	Precipitação mensal (a) e número de dias chuvosos (b) na estação de monitoramento de Vitória-ES (Goiabeiras). Dados referentes aos anos de 2007 a 2016	69
Figura 15	Localização do Campus Vitória na Avenida Vitória, em Jucutuquara	70
Figura 16	Espaços selecionados para monitoramento	71
Figura 17	Planta e fotografia da Sala H4	73
Figura 18	Planta e fotografia da Sala C5	73
Figura 19	Planta e fotografia da Sala E5	74
Figura 20	Ambiente externo (portaria)	74
Figura 21	Concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} para os ambientes EXT e H4 para abertura máxima de janelas na sala de aula	82
Figura 22	Concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} para os ambientes EXT e H4 para abertura parcial de janelas na sala de aula	82
Figura 23	Concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} para os ambientes EXT e H4 para janelas fechadas	83
Figura 24	Concentrações de CO para os ambientes EXT, H4 e C5, de acordo com as configurações de abertura: a) máxima, b) parcial e c) fechada	87
Figura 25	Concentrações médias e máximas de $MP_{2,5}$ e MP_{10} ao longo da semana	89
Figura 26	Condições registradas de precipitação para a estação Vitória (A612)	93
Figura 27	Fileira de árvores junto à fachada principal do campus	94
Figura 28	Variação das concentrações de $MP_{2,5}$ conforme a ocupação e configuração de aberturas, ao longo do tempo, para as salas E5	95
Figura 29	Variação das concentrações de $MP_{2,5}$ conforme a ocupação e configuração de aberturas, ao longo do tempo, para as salas E5	96

Figura 30	Variação das concentrações de MP_{10} conforme a ocupação e configuração de aberturas, ao longo do tempo, para as salas E5 (a) e H4 (b)	96
Figura 31	Distribuição dos registros de CO_2 em função das aberturas adotadas	97
Figura 32	Evolução temporal do CO_2 e períodos de ocupação (cinza) na E5	99
Figura 33	Evolução temporal do CO_2 e períodos de ocupação (cinza) na H4	100
Figura 34	Ocupação com janelas e portas fechadas, com uso de ar-condicionado – sala H4	105
Figura 35	Variáveis com o tempo. Sala E5: janelas fechadas e ar-condicionado ligado	106
Figura 36	Variação de temperatura, umidade e dióxido de carbono. Salas H4 (a) e E5 (b): janelas e/ou portas abertas e ar-condicionado ligado	108
Figura 37	Variação de temperatura, umidade e dióxido de carbono. Salas H4 (a) e E5 (b): janelas e portas abertas e ar-condicionado desligado	111
Figura 38	Médias horárias de $MP_{2,5}$ para o ambiente EXT, na campanha 1	112
Figura 39	Médias horárias de $MP_{2,5}$ para o ambiente EXT, na campanha 2	113
Figura 40	Médias horárias de $MP_{2,5}$ para a sala H4, na campanha 1	113
Figura 41	Médias horárias de $MP_{2,5}$ para a sala H4, na campanha 2	114
Figura 42	Médias horárias de $MP_{2,5}$ para a sala E5, na campanha 2	114
Figura 43	Relação I/O de $MP_{2,5}$, na sala H4 para a campanha 1	115
Figura 44	Relação I/O de $MP_{2,5}$, na sala H4 para a campanha 2	115
Figura 45	Relação I/O de $MP_{2,5}$, na sala E5 para a campanha 1	116
Figura 46	Médias horárias de MP_{10} para o ambiente EXT, na campanha 1	116
Figura 47	Médias horárias de MP_{10} para o ambiente EXT, na campanha 2	117
Figura 48	Médias horárias de MP_{10} para a sala H4, na campanha 1	117
Figura 49	Médias horárias de MP_{10} para a sala H4, na campanha 2	117
Figura 50	Médias horárias de MP_{10} para a sala E5, na campanha 2	118
Figura 51	Relação I/O de MP_{10} , na sala H4 para a campanha 1	118
Figura 52	Relação I/O de MP_{10} , na sala H4 para a campanha 2	119
Figura 53	Relação I/O de MP_{10} , na sala E5 para a campanha 1	119
Figura 54	Médias horárias de CO para salas H4 e C5 e ambiente EX, na campanha 1	119
Figura 55	Médias horárias de CO para salas H4 e C5 e ambiente EX, na campanha 1	120
Figura 56	Caracterização da QAI de acordo com a opinião dos ocupantes	121
Figura 57	Molde das vias aéreas dos pulmões humanos, sem os alvéolos	161
Figura 58	Subdivisão gradativa das vias aéreas humanas em gerações	162
Figura 59	O alvéolo e a membrana alvéolo-capilar	163
Figura 60	Vista da sede da ETV na década de 1940	169
Figura 61	Vista da sede da ETV na década de 1950	169
Figura 62	Edifício do Ifes Campus Vitória: ao fundo, o teatro	170
Figura 63	Edifício do Ifes Campus Vitória: jardim, pátio e biblioteca	171
Figura 64	Uso dos pilotis no Campus Vitória, do Ifes (a) pátio central visto do jardim e (b) pátio central visto de dentro	171
Figura 65	a) Planta de Implantação do Campus Vitória. b) Imagem aérea	172
Figura 66	Histograma dos resíduos do modelo de regressão para os CO_2	175
Figura 67	Histograma do modelo de regressão para os dados de $MP_{2,5}$ e MP_{10}	176

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Requisitos normativos e legais para a QAI em ambientes não residenciais e/ou salas de aula, considerando a concentração de CO ₂ e/ou trocas de ar por hora	56
Quadro 2	Referências da NAAQS e ANSI/ASHRAE 62.1-2019 para qualidade do ar	57
Quadro 3	Resumo do experimento de campo	75
Quadro 4	Instrumentos de medição e suas características	76
Quadro 5	Exemplo de formulário de registro de ocupação, comportamento dos usuários e utilização das salas de aula	78
Quadro 6	Configurações das janelas das salas de aula durante a campanha 1	81
Quadro 7	Dados registrados para os ambientes EXT e H4 nas datas dos incêndios	90
Quadro 8	Médias de CO ₂ de acordo com as aberturas, por ambiente	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Concentrações de dióxido de carbono e taxas de ventilação em salas de aula naturalmente ventiladas, durante períodos de ocupação (períodos de ensino)	31
Tabela 2	Níveis recomendados conforme diretrizes da qualidade do ar de 2021	55
Tabela 3	Classificação da Qualidade do Ar na Grande Vitória a partir dos dados coletados pelas estações de monitoramento para médias horárias, de 8 e de 24 horas	67
Tabela 4	Características construtivas e de ocupação dos ambientes monitorados	72
Tabela 5	Análise das concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} para a campanha 1	84
Tabela 6	Análise das concentrações de $MP_{2,5}$, conforme abertura, camp. 1	84
Tabela 7	Análise das concentrações de MP_{10} , conforme abertura, camp. 1	86
Tabela 8	Variação de médias horárias de material particulado	88
Tabela 9	Atendimentos de incêndio realizados em cinco municípios da Grande Vitória (a) e especificamente no Município de Vitória-ES	91
Tabela 10	Medidas resumo das concentrações de poluentes, considerando todas as configurações de aberturas de janelas e portas	92
Tabela 11	Estimativas dos coeficientes e respectivos p -valores do teste <i>t-student</i> pra os dados de CO_2	101
Tabela 12	Estimativas dos coeficientes e respectivos p -valores do teste <i>t-student</i> pra os dados de $MP_{2,5}$	102
Tabela 13	Estimativas dos coeficientes e respectivos p -valores do teste <i>t-student</i> pra os dados de MP_{10}	103
Tabela 14	Dados dos ambientes H4 e E5, nos dias 16 de dezembro e 04 de novembro	104
Tabela 15	Dados dos ambientes H4 e E5, nos dias 01 de dezembro e 09 de novembro	107
Tabela 16	Dados dos ambientes H4 e E5, nos dias 12 de novembro e 17 de novembro	110
Tabela 17	Análise descritiva das respostas do questionário	121
Tabela 18	Resultados do modelo	123
Tabela 19	Resultados dos testes de Kruskal-Wallis/Mann-Whitney	125

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT –	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APA –	Agência Portuguesa do Ambiente
ANVISA –	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASHRAE –	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
CO –	Monóxido de carbono
CO ₂ –	Dióxido de carbono
CONAMA –	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVID-19 –	<i>Corona virus disease 2019</i> (em português: doença do coronavírus de 2019)
EPA –	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETV –	Escola Técnica de Vitória
FNDE –	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
IBGE –	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEMA –	Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IFES –	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo
IJSN –	Instituto Jones dos Santos Neves
INCAPER –	Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural
INEP –	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira
INMET –	Instituto Nacional de Meteorologia
IQAr –	Índice de Qualidade do Ar
MP _{2,5} –	Material Particulado tipo 2,5 micrômetros ($\varnothing < 2,5\mu\text{m}$): partículas respiráveis
MP ₁₀ –	Material Particulado tipo 10 micrômetros ($2,5 < \varnothing < 10\mu\text{m}$): partículas inaláveis
NAAQS –	<i>National Ambient Air Quality Standards</i>
OMS –	Organização Mundial de Saúde (o mesmo que WHO)
ONU –	Organização das Nações Unidas (em inglês: <i>United Nations</i>)
QAI –	Qualidade do Ar Interior (em inglês: <i>Indoor Air Quality - IAQ</i>)
RMGV –	Região Metropolitana da Grande Vitória
SARS-CoV-2	Síndrome Respiratória Aguda Grave Coronavírus 2
SED –	Síndrome do Edifício Doente
WHO –	<i>World Health Organization</i> (o mesmo que OMS)

RESUMO

SILVA, Saulo Vieira de Oliveira. M.Sc, Universidade Vila Velha – ES, junho de 2022. **Qualidade do Ar Interno em salas de aula naturalmente ventiladas durante a pandemia de COVID-19.** Orientadora: Dr^a Érica Coelho Pagel.

A poluição do ar causa milhões de mortes por ano, mundialmente. Em escolas, a baixa qualidade do ar está relacionada a prejuízos à saúde e ao ensino e aprendizagem, pois pode afetar o desempenho, a atenção e provocar absenteísmo. A condição do ar interno pode ser agravada pela entrada de poluentes através de aberturas, por ventilação ou infiltrações, como também em razão de fatores associados ao local, como padrões de ocupação e utilização de janelas e portas. Devido a pandemia de COVID-19, novos desafios foram postos à Qualidade do Ar Interior (QAI) em escolas, dado o tempo de permanência e a densidade ocupacional característicos. Esse trabalho objetivou investigar a qualidade do ar em salas de aula naturalmente ventiladas numa instituição de ensino de Vitória – ES, analisando as concentrações de CO₂, MP_{2,5}, MP₁₀, CO, temperatura e umidade, além dos modos de utilização de aberturas e padrões de ocupação dos ambientes. Também avaliou a relação entre a percepção dos usuários e os dados monitorados. A metodologia abrangeu a revisão bibliográfica, a pesquisa quantitativa por meio do levantamento de dados com instrumentos de medição, formulários de observação e aplicação de questionários, e a pesquisa explicativa. O levantamento de campo foi dividido em duas campanhas, uma com salas desocupadas e outra com a presença de alunos e professores. A análise estatística dos dados monitorados compreendeu a aplicação de testes de hipóteses ANOVA e *t-student* e a regressão linear múltipla. Para a verificação de relação entre variáveis e respostas dos questionários, aplicou-se o teste de qui-quadrado e a regressão ordinal. Como resultados, considerando as médias de 24 horas, nas duas campanhas, o material particulado e o monóxido de carbono não superaram as diretrizes da Organização Mundial de Saúde (OMS), apesar de ter havido picos de ultrapassagem. No primeiro monitoramento, a sala mais próxima da avenida apresentou médias horárias continuamente superiores ao limite estabelecido para média anual de MP_{2,5}, pela OMS. A sala de aula mais próxima à avenida foi afetada pela poluição por particulados de maneira semelhante ao ambiente externo. O fechamento total de janelas possibilitou redução de 9,28% e 12,63% para MP_{2,5} e MP₁₀. Durante a campanha 2, as médias de particulados foram, aproximadamente, 50% mais baixas em comparação a campanha 1, como possível consequência da atuação de fatores como a deposição úmida e a prática de lavagem de piso. Os picos de concentração de material particulado foram mais acentuados na sala próxima à via de tráfego, em comparação a mais afastada. A análise de regressão revelou haver correlação entre a poluição externa e a interna, tanto para o MP_{2,5} quanto para o MP₁₀. A abertura simultânea de janelas e portas permitiu maior eficiência da renovação de ar, com média geral de 449 ppm de CO₂, contra 1059 ppm de média e máximo de 2406 ppm para salas totalmente fechadas. As configurações que mantiveram abertura constante resultaram em concentrações que representam renovação de ar eficiente, o que, de acordo com a literatura científica atual, é uma das medidas preventivas contra a propagação da COVID-19.

Palavras-chave: Qualidade do Ar Interior (QAI); escolas; ventilação natural; covid-19

ABSTRACT

SILVA, Saulo Vieira de Oliveira, M. Sc., Universidade Vila Velha – ES. June, 2022.
Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Classrooms during the COVID-19 Pandemic. Advisor: Dr^a. Érica Coelho Pagel.

Air pollution is the cause of millions of deaths worldwide each year. In schools, poor air quality is related to damage to health and the teaching and learning process, as it can affect performance and attention and cause absenteeism. The condition of the indoor air can be aggravated due to the access of external pollutants through the openings, either by ventilation or infiltrations. It can also change due to factors associated with the location, such as occupancy patterns and the use of windows and doors. Due to its long-stay characteristics and higher occupational density in classrooms, the COVID-19 pandemic had brought new challenges to Indoor Air Quality (IAQ). This work investigated the air quality in naturally ventilated classrooms in a teaching institution in Vitória - ES, analyzing the concentrations of CO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, CO, temperature, and humidity, in addition to the use of openings and the occupation patterns of indoors. It also assessed the relationship between users' perceptions and the monitored data. The methodology was the literature review and quantitative research through data collection with measuring instruments, observation forms, as well as the application of questionnaires. The research was also explanatory, in identifying factors related to IAQ. The field survey was divided into two campaigns, the first with unoccupied rooms and the second with the presence of students and teachers. Statistical analysis of monitored data comprised the application of ANOVA and t-student hypothesis tests and multiple linear regression. To verify the relationship between variables and questionnaire responses, the chi-square test of independence was applied and, later, ordinal regression. As a result, considering the 24-hour averages particulate matter and carbon monoxide did not exceed the World Health Organization (WHO) guidelines, despite the fact that there were peaks in excess in both campaigns. In the first monitoring, the room closest to the avenue presented hourly averages that were continuously higher than the limit established for the annual average of PM_{2.5}, by the WHO. The classroom closest to the avenue was affected by particulate pollution in a similar way to the external environment. The total closing of windows allowed a reduction of 9.28% and 12.63% for MP_{2.5} and MP₁₀. During the occupancy period, the particulate matter averages were approximately 50% lower compared to the unoccupied period, as a consequence of factors such as wet deposition and the practice of floor washing. The particulate matter concentration peaks were more accentuated in the room closest to the traffic lane, compared to the room further away. Regression analysis revealed a positive impact of external pollution for both PM_{2.5} and PM₁₀. The arrangement of opening windows and doors simultaneously allowed for greater efficiency of air renewal, with an overall average of 449 ppm of CO₂, against an average of 1059 ppm and a maximum of 2406 ppm for fully enclosed rooms. The configurations that maintained constant opening resulted in concentrations that represent adequate air renewal as a complementary preventive measure against COVID-19.

Keywords: Indoor Air Qualit (IAQ); schools; natural ventilation; covid-19

1 INTRODUÇÃO

Estudos indicam que, em ambientes internos, o ar pode ser rico em poluentes físicos, químicos e biológicos uma vez que as taxas de renovação de ar por vezes são baixas (EPA, 2018; BRICKUS; AQUINO NETO, 1999). Nesses locais, a concentração de contaminantes em suspensão pode ser de duas a cinco vezes maior se comparado ao ar externo (EPA, 2018; SCHIRMER *et al.*, 2011; GIODA; AQUINO NETO, 2003).

Os espaços educacionais, depois dos residenciais, são aqueles em que crianças, adolescentes e professores passam grande parte de seu tempo em dias úteis. Dados do INEP¹ (2019) informaram que a média de horas-aula diária, no Brasil, é de 6,1 horas na Educação Infantil, de 4,6 horas no Ensino Fundamental e 5,2 horas no Ensino Médio. Ambientes escolares têm se tornado objeto de preocupação crescente na comunidade científica porque também a densidade de ocupação se caracteriza por ser maior do que em outros tipos de edifícios (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020).

No ambiente escolar, cuja finalidade é prover local para o sucesso da relação ensino-aprendizagem, aspectos multidisciplinares possuem grande influência neste processo, como currículo, método de ensino, formação de professores e também as características arquitetônicas, que influenciam as ações de estudantes e professores (KOWALTOWSKI, 2011).

A possibilidade de apropriação das esquadrias pelos usuários é relevante para a qualidade do ar no ambiente interno pois, quando planejadas adequadamente, podem propiciar a trocas do ar pela ação dos ventos no local. Pelo fato de se tratar de um espaço não residencial, numa sala de aula, as condições da ventilação nem sempre estão sob o controle dos ocupantes e sim de um responsável. De uma forma ou de outra, estudos mostram que o uso das janelas pelos seus ocupantes pode estar mais relacionado ao desconforto térmico no ambiente do que com a poluição do ar, que muitas vezes não é perceptível ao usuário (HERACLEOUS; MICHAEL, 2019; DUARTE; GOMES; RODRIGUES, 2017).

A preocupação com a Qualidade do Ar Interior (QAI) é importante porque a inalação é uma das principais rotas de transmissão de poluentes ao corpo humano.

1 Referentes a áreas urbanas.

Pela via inalatória, os contaminantes podem agir diretamente sobre o sistema respiratório e, a longo prazo, causar prejuízos a outros sistemas do organismo (GODISH, 2000; KEELER; VAIDYA, 2018).

Muitas vezes as pessoas não têm domínio do seu olfato, ao contrário do que acontece com a visão (basta fechar os olhos), com o paladar (basta não comer), e com o tato. Com o sistema respiratório, ocorre de maneira análoga ao olfato: poluentes são inalados e respirados pelos indivíduos, conforme estão presentes no ar.

O interesse científico pela Qualidade do Ar Interior (QAI) em ambientes escolares cresce gradativamente. Um estudo, que se destaca como um dos pioneiros, foi realizado no século XIX por Elias Heymann, analisou concentrações de dióxido de carbono em escolas na Suécia (SUNDELL, 2004). Na década de 1980, um artigo de autoria de Lebowitz (1983) alertava para os perigos à saúde ocasionados pela liberação de fibras de asbestos em ambientes escolares no Arizona, Estados Unidos, entre outras preocupações. Em 1987, o Departamento Estadual de Educação de Maryland, Estados Unidos, publicou um documento com intuito de fornecer parâmetros para construção, manutenção e operação para garantir a boa qualidade ambiental por meio de considerações sobre conforto térmico e controle de poluentes (MARYLAND, 1987).

Nas décadas de 1990 e de 2000, estudos da qualidade do ar interior a respeito de espaços escolares foram realizadas com variadas abordagens: a percepção da qualidade do ar pelos usuários (SMEDJE; NORBACK; EDLING, 1997); a exposição a poluentes microbiológicos, especialmente fungos (LEVETIN *et al.*, 1995; COOLEY *et al.*, 1998); a comparação entre poluentes internos e externos, entre eles os particulados (LEE; MAUREEN, 1999); a relação entre asma e a QAI (SMEDJE; NORBACK; EDLING, 1997); a importância da ventilação em salas de aula como forma de melhoria do ambiente (LUGG; BATTY, 1999; COLEY; BEISTEINER, 2002; SHENDELL *et al.*, 2004), bem como o controle da concentração de radônio (FISHER *et al.*, 1994; GRUBB; DIAMANTES, 1998).

Atualmente, pesquisas relacionam a ventilação e a renovação de ar - observada por intermédio das concentrações de dióxido de carbono; com padrões ocupacionais e de utilização no ambiente interno, aspectos que têm sido correlacionados à qualidade do ar (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020;

SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020; MA; ZHAN; XU, 2019). Também há trabalhos que monitoraram uma combinação de dois ou mais poluentes e avaliaram sua relação com a renovação de ar (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020; MAJD *et al.*, 2019; TRAN *et al.*, 2017; MAINKA; ZAJUSZ-ZUBEK, 2015).

Em escolas, diversos poluentes têm alcançado concentrações acima das permitidas pelos padrões de qualidade (DENG; LAU, 2019). Há trabalhos que apontam a influência da contaminação do ar em salas de aula no rendimento dos alunos, no que diz respeito à saúde, à participação, ao absenteísmo e ao desempenho dos estudantes em tarefas escolares (EPA, 2018; ALMEIDA *et al.*, 2017; SHENDELL *et al.*, 2004).

Portanto, a preocupação com o acúmulo de poluentes se relaciona à questão da salubridade em salas de aula. Nos Estados Unidos, onde aproximadamente 10% das crianças em idade escolar foram diagnosticadas com asma ou outras doenças respiratórias, mais de 50% delas frequentavam ambientes com ventilação insuficiente para garantir a renovação do ar. Estima-se que 55 milhões de estudantes e funcionários de escolas sejam afetados pela má qualidade do ar neste país (HESS-KOSA, 2019).

No Brasil, considerando a faixa etária de 13 a 17 anos (idade compatível ao ensino médio); 21,4% dos estudantes apresentaram problemas respiratórios num período de 12 meses e 15,8% destes já tiveram episódio de asma alguma vez na vida (IBGE, 2015). Dados estes que merecem atenção de arquitetos e pesquisadores da área de saúde quanto à qualidade do ar interno nas escolas brasileiras.

Segundo a EPA (2018), entre as doenças crônicas, a asma é o principal motivo para o absenteísmo nas escolas. A exposição a alérgenos, bem como à poluição oriunda do escapamento de veículos são considerados alguns dos gatilhos e exacerbadores da asma e de alergias. Com isso, além das faltas, outros prejuízos como impactos ao conforto, à participação e ao desempenho prejudicam o aproveitamento dos estudantes.

O monitoramento das concentrações de contaminantes no ar é o procedimento que permite caracterizar seus níveis de poluição. O acompanhamento da quantidade de poluentes é uma maneira efetiva de manter ou de se avaliar a qualidade do ar interior. Como estratégias de mitigação, a mais utilizada, é a troca do ar poluído por ar limpo, obtida tanto pela ventilação natural como pela mecânica

(CARMO; PRADO, 1999). Entretanto, para saber em que medida essas alternativas podem ser eficientes, é preciso reconhecer os principais tipos de poluentes capazes de comprometer os ambientes nas edificações, bem como avaliar as taxas de renovação praticadas.

O dióxido de carbono (CO_2) é um gás oriundo da atividade metabólica do organismo humano e, no ambiente interno, frequentemente alcança concentrações muito superiores às do ar exterior² (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020; TRAN *et al.*, 2015; FERREIRA; CARDOSO, 2013; DENG; LAU, 2009. Tradicionalmente, considera-se que altos níveis³ deste gás sinalizam que outros poluentes podem ter alcançado altas concentrações. Por isso, sua quantidade é um indicador da renovação do ar e da qualidade do ar interior (ALMEIDA *et al.*, 2017; SATISH *et al.*, 2012; ANVISA, 2003). Além disso, altas concentrações deste gás estão relacionadas à diminuição do desempenho dos estudantes e professores (MUSCATIELLO *et al.*, 2014; FERREIRA; CARDOSO, 2013; COLEY; GREEVES; SAXBY, 2007; ALMEIDA *et al.*, 2017; SATISH *et al.*, 2012).

O monóxido de carbono (CO) é um poluente oriundo da queima incompleta de combustíveis fósseis e está relacionada, entre outras fontes, à emissão veicular (NOWACKI; RANGEL, 2014; WHO, 2010; ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009), pode prejudicar a oxigenação dos tecidos dos sistemas do organismo humano (WEST, 2013; NOWACKI; RANGEL, 2014), com possíveis danos ao sistema nervoso, cardiovascular e respiratório (IEMA, 2019; NOWACKI; RANGEL, 2014; WHO, 2010). Em ambientes internos próximos a grandes fontes, como vias de grande tráfego de veículos, pode ser encontrado em altas concentrações (SEINFELD; PANDIS, 2016; WHO, 2010).

O Material Particulado (MP) é o nome dado a um grupo de poluentes de diferentes origens e constituições, composto por partículas sólidas ou líquidas em suspensão no ar. Pode ser de origem mineral, orgânica, da combustão, entre outras fontes (SEINFELD; PANDIS, 2016; APA, 2009; ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009; MORAES, 2006). O material particulado pode ser classificado em Total em suspensão ($\varnothing < 50 \mu\text{m}$), Grosso ($2,5 \mu\text{m} < \varnothing < 10 \mu\text{m}$) e Fino ($\varnothing < 2,5 \mu\text{m}$), ou ainda denominados MP_{10} ($\varnothing < 10 \mu\text{m}$) e $\text{MP}_{2,5}$ ($\varnothing < 2,5 \mu\text{m}$), de grande interesse em ambientes de longa

2 No ar externo, em regiões urbanas, trabalhos recentes encontraram concentrações que variaram de 400 ppm a 600 ppm (DORIZAS *et al.*, 2015; LAZOVIC *et al.*, 2015; SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020).

3 Ao longo deste trabalho, por “níveis” entenda-se “valores de concentração”.

permanência, como escolas, por serem causadores ou agravadores de doenças respiratórias e cardiopulmonares (GINA, 2020; WHO, 2010; FENGER, 2009).

Espaços urbanos, por suas características populacionais, de tráfego de veículos a combustão e presença de indústrias, são locais propensos a maior poluição do ar externo (IEMA, 2019; FENGER, 2009). O município de Vitória figura entre os que possuem as maiores taxas de urbanização e é também o mais proporcionalmente urbanizado do Estado do Espírito Santo (JABOUR DE FRANÇA; BERGAMASCHI, 2011).

Tanto o monóxido de carbono quanto o material particulado estão entre os principais poluentes em zonas urbanas próximas a indústrias e locais com grande tráfego de veículos (WHO, 2010; SEINFELD; PANDIS, 2016; WHO, 2005), sendo que o material particulado, especificamente, está entre os principais poluentes da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) (IEMA, 2019). O objeto de pesquisa se localiza no município de Vitória, que faz parte da RMGV. Nessa região, no ano de 2019, registrou-se ultrapassagem dos parâmetros da Organização Mundial de Saúde para o MP_{2,5} (IEMA, 2019).

O acompanhamento do monóxido de carbono e do material particulado pode apontar a contribuição do entorno para a poluição do ar (IEMA, 2019). Além disso, medições simultâneas de CO₂ e MP_{2,5} são úteis para se avaliar a QAI no que diz respeito à necessidade de ventilação e renovação de ar, como também as concentrações de poluentes em salas de aula (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020).

1.1 Contextualização à qualidade do ar em salas de aula e a Covid-19

Atualmente, desafios foram agregados ao campo da Qualidade do Ar pela pandemia de Covid-19, uma infecção respiratória causada pelo vírus SARS-CoV-2 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021), cujo modo primordial de transmissão é de pessoa para pessoa através do contato com gotículas em suspensão ou pelo toque nos olhos, boca ou nariz após o contato com superfícies contaminadas (AAP, 2021; CDC, 2021).

Após o surgimento da Doença do Coronavírus 2019, conhecida como Covid-19, na China, no final de 2019 (WHO, 2021), foi declarada pandemia em 12 de março de 2020 (CIOTTI *et al.*, 2020). Em várias nações, houve fechamento de fronteiras, locais públicos, de trabalho (SCHUCHMANN *et al.*, 2020) e, inclusive, de escolas, por possuírem alta densidade ocupacional, alto tempo de permanência e,

muitas vezes, sistemas de ventilação inadequados (LOVEC; PREMROV; LESKOBAR, 2021; KAPOOR *et al*, 2021).

Houve suspensão de atividades escolares no Brasil a partir de março de 2020 até, pelo menos, maio de 2021. Algumas instituições de ensino mantiveram a suspensão por mais tempo, retornando com ensino híbrido e, posteriormente, presencial. O Brasil foi um dos países que parou por mais tempo, o que significa (INEP, 2021; UNESCO, 2021; BUENO; SOUTO; MATTA, 2021).

No atual contexto, em conjunto à necessidade do ar limpo, ou seja, com baixas concentrações de poluentes, tem-se a demanda por ambientes internos seguros aos usuários, além de bem ventilados (SCOTFORD, 2020). A abertura de portas e janelas pode proporcionar a ventilação e renovação de ar, o que permite a diluição de potenciais contaminantes devido à redução da concentração de partículas virais (AAP, 2021; CDC, 2021).

Por isso, cresce a relevância do campo de estudo da qualidade do ar interior no contexto da pandemia de Covid-19, quanto aos aspectos construtivos e ocupacionais do ambiente, principalmente no que tange as trocas de ar. A avaliação da qualidade do ar em ambientes coletivos, sobretudo escolares pela sua aglomeração, longa permanência e obrigatoriedade para crianças e adolescentes, se torna primordial.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral:

Investigar a qualidade do ar interior em salas de aula naturalmente ventiladas e sua relação com as características de utilização das aberturas, os padrões de ocupação e sua proximidade à via arterial de tráfego veicular, em escola localizada no município de Vitória, ES.

1.2.2 Específicos:

- Analisar a influência dos padrões de aberturas das janelas na relação das concentrações internas de CO, MP_{2,5} e MP₁₀ em salas de aula com a contribuição dos poluentes provenientes do entorno urbano;
- Avaliar a qualidade do ar interior relacionando as concentrações de CO₂ aos padrões de ocupação, no que se refere à densidade ocupacional, e ao

comportamento adaptativo, no que diz respeito à utilização de janelas e padrões de abertura adotados;

- Avaliar a relação entre a percepção dos usuários quanto à qualidade do ar e os parâmetros ambientais de concentração de CO₂, temperatura do ar e umidade relativa do ar.

1.3 Síntese da metodologia

Para se atingir os objetivos deste trabalho, foi realizado um experimento de campo em salas de aula naturalmente ventiladas integrantes do Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes, Campus Vitória. O edifício é representativo da arquitetura escolar moderna realizada nas décadas de 1930 a 1950 em todo o Brasil. Utilizaram-se medidores de qualidade do ar de baixo custo para o monitoramento de CO₂, CO, MP_{2,5} e MP₁₀, além de termo-anemômetros para registro de velocidade, temperatura e umidade relativa do ar. Padrões de ocupação, atividades desempenhadas nos ambientes e uso de janelas e portas para ventilação foram registrados em formulário específico. A metodologia é detalhada no capítulo 3 deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve explanação sobre: 2.1) a qualidade do ar, 2.2) a qualidade do ar interior em salas de aula, 2.3) os parâmetros ambientais e poluentes da QAI, 2.4) a doença do coronavírus de 2019 e o ambiente de ensino e 2.5) legislação e normas referentes à qualidade do ar de interiores.

2.1 A Qualidade do ar

2.1.1 Poluição atmosférica em áreas urbanas

A Poluição do ar é um problema complexo com muitas causas relacionadas às atividades antrópicas. Há fontes oriundas da agricultura, com uso de fertilizantes; da pecuária (amônia); da indústria (dióxido de enxofre, etc) e de escapamentos de veículos, com os compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio, entre outras. A escala da poluição aumentou com o tempo e com a extensão da ocupação humana (FENGER, 2009; NOWACKI; RANGEL, 2014).

Poluente atmosférico é qualquer forma de matéria que, segundo sua quantidade, concentração, tempo de permanência ou outra característica, tem o efeito de tornar o ar inconveniente ao bem-estar público, à segurança, às atividades comunitárias, prejudicial ao gozo da propriedade ou, de maneira mais grave, ser impróprio à saúde ou lesivo a ela. Além de danoso aos seres humanos, se apresenta nocivo aos materiais, à fauna e flora, segundo conceito enunciado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2018). Ou seja, a poluição atmosférica se refere à adição de substâncias prejudiciais tanto ao meio ambiente, como à saúde e à qualidade de vida (NOWACKI; RANGEL, 2014).

A Qualidade do Ar tem sido uma questão em evidência há muito tempo devido aos potenciais danos da poluição à saúde das pessoas, e alguns eventos marcaram a história dessa disciplina. Um acontecimento numa cidade no Vale do Meuse, em 1930 na Bélgica, levou à aceitação geral de que a poluição do ar é danosa em altas concentrações após a morte de 60 pessoas cujas autópsias mostraram irritação aguda do trato respiratório (ANDERSON, 2009; NOWACKI; RANGEL, 2014). No episódio de 1952, em Londres, um período de quatro dias e níveis sem precedentes de poluição resultou direta e indiretamente em mais de 4.000 mortes (FENGER, 2009). Há décadas, o noticiário frequentemente apresenta situações

relacionadas à baixa qualidade atmosférica (CNN, 2000; O GLOBO, 1970, 1972, 1978).

Eventos de grande poluição do ar e mortalidade levaram a providências de cunho científico e político. A conferência de Estocolmo (1972), os Protocolos de Montreal (1987), de Gotemburgo (1999), de Quioto (1997), são importantes marcos da história na administração das condições que influenciam no controle da poluição do ar (KEELER; VAIDYA, 2018; FENGER, 2009).

Em nível global, há dados alarmantes a respeito do número de mortos relacionados à poluição do ar interno e externo, que chegou ao patamar de 7 milhões em 2016, dos quais 94% das ocorrências foram em países em menos ricos. Em relação ao total, são 329.000 mortes nas Américas, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento (WHO, 2018).

A qualidade do ar tende a diminuir com o crescimento das cidades que, entre outros fatores, ocorre pela migração de pessoas oriundas do campo principalmente nos países em desenvolvimento. Alguns dos motivos para a deterioração da qualidade atmosférica são a transferência de indústrias poluidoras para países com legislação ambiental menos rigorosa e o acréscimo significativo do tráfego de veículos a combustão (FENGER, 2009). Contribui ainda o fenômeno de saturação da malha viária, principalmente em horários de pico de grandes cidades (FERREIRA; CARDOSO, 2013; BRICKUS; AQUINO NETO, 1999). O crescimento das áreas urbanas, seja por fatores de ordem econômica, social ou de outra natureza, é um fenômeno a nível mundial que ocorre na maioria das regiões (JABOUR DE FRANÇA; BERGAMASCHI, 2011).

Com o tempo, a população das cidades forma uma maioria cada vez mais significativa. Em 2019, a humanidade alcançou o patamar de aproximadamente 7,71 bilhões de indivíduos (UNITED NATIONS, 2019). Dados da Organização das Nações Unidas (ONU) informam que 55% da população mundial vive em áreas urbanas. Na América Latina e no Caribe, este valor chega a 81%, o que representa cerca de 526 milhões de pessoas, com perspectiva de crescer até 685 milhões até 2050, segundo informa o Prospecto da Urbanização Mundial (UNITED NATIONS, 2019).

No contexto brasileiro, é ainda mais representativa a parcela da população residente em meio urbano. Pesquisas datadas de 2010 apontaram que cerca de 84,36% da população era urbana (IBGE, 2010). Segundo a ONU, em 2018 estimava-se que 87% dos aproximadamente 211 milhões de pessoas residiam em

assentamentos urbanos (UNITED NATIONS, 2019). Atualmente, calcula-se que o Brasil possua aproximadamente 214,608 milhões de habitantes (IBGE, 2022). Sabe-se que o número de pessoas representa um dos três principais parâmetros que determinam a pressão humana sobre meio ambiente (FENGER, 2009).

A poluição oriunda das grandes cidades podem afetar tanto o entorno urbanizado como também a longas distâncias devido ao transporte do poluente atmosférico. Com isso, o impacto da poluição não fica restrita ao local de origem (PELÁEZ *et al.*, 2020).

Existe também uma estreita relação entre as condições meteorológicas, a topografia, o clima e as condições da qualidade do ar. Além disso, a poluição é influenciada por fenômenos como El Niño e La Niña devido a alterações nos padrões de circulação atmosféricas em diferentes níveis, bem como pela mudança no regime de chuvas, de forma que afetam de maneira diferente os níveis de contaminantes no ar (PELÁEZ *et al.*, 2020).

PELÁEZ *et al.* (2020) observa, em sua avaliação dos dados de monitoramento da qualidade do ar em grandes cidades da América do Sul entre os anos de 2010 e 2017, diversos locais apresentaram continuamente ultrapassagens dos valores recomendados pela OMS para partículas respiráveis (MP_{2,5}), apesar de, pontualmente, algumas cidades terem apresentado reduções.

Embora seja notório que a poluição da atmosfera urbana por si só represente um problema urgente, por outro lado ela também é uma grande fonte de contaminantes para os ambientes internos, uma vez que neles entra pelas janelas, portas e sistemas de ventilação, representando uma fonte de poluição para o ar interior (HESS-KOSA, 2019; EPA, 2018; KEELER; VAIDYA, 2018; BRICKUS; AQUINO NETO, 1999).

2.1.2 Qualidade do Ar Interior (QAI)

Sabe-se que a poluição do ar externo impacta diversos elementos do ambiente. A baixa qualidade do ar em ambientes internos pode também trazer prejuízos ao organismo humano (EPA, 2018) e essa questão muitas vezes não recebe necessária atenção, mesmo de engenheiros e arquitetos (KEELER; VAIDYA, 2018). Os sintomas e impactos à saúde vão desde a dor de cabeça, fadiga, falta de ar, tosse, espirros, irritação nos olhos, garganta e nariz, tontura, náusea a problemas mais

graves como pneumonias, câncer e doenças cardíacas. A dificuldade em relacionar aos problemas da qualidade do ar se dá pelo fato de que estes sintomas podem também possuir outras causas (EPA, 2018).

Grande parte das atividades são realizadas em ambientes internos. Uma pesquisa indicou que os americanos passam 86,9% do tempo dentro das edificações, sejam eles residências (68,7%), locais de trabalho, bares, restaurantes, escolas, entre outros (KLEPEIS, 2001). O uso dos espaços interiores é inerente à humanidade, seja pela necessidade de abrigo do tempo e do clima, seja pelo conforto e conveniências oferecidas pelas estruturas que nos permitem desempenhar nossas atividades, como: escolas, hospitais, edifícios governamentais, mercados, complexos de escritórios, entre outros (GODISH, 2000).

Uma das possíveis consequências do aumento desordenado das cidades é a precarização dos espaços abertos, que devido ao crescente adensamento nas cidades brasileiras e suas quadras, reduz a quantidade e/ou a qualidade das áreas livres e força a demanda por espaços internos (GONÇALVES; FLORES, 2017; FIGUEIREDO, 2012; PEQUENO, 2008). O estilo de vida urbano contemporâneo se caracteriza pelo fato de as pessoas passarem muitas horas, diariamente, dentro de ambientes residenciais ou não residenciais (BRICKUS; AQUINO NETO, 1999).

As pessoas, ao providenciarem abrigo e comodidades para suas atividades, inadvertidamente ou deliberadamente introduzem contaminantes que potencialmente diminuem a qualidade do espaço e trazem riscos à sua saúde. Ambientes internos podem estar contaminados por substâncias tóxicas perigosas e poluentes de origem biológica (GODISH, 2000).

O campo de estudo da Qualidade do Ar Interior se desenvolveu a partir de alguns acontecimentos históricos. Na década de 70 do século XX, em virtude da crise do petróleo, iniciou-se uma tendência de “envelopar” os edifícios com objetivo de economizar energia, pois as trocas de ar alteram a temperatura interna. Sendo mais barato recircular o ar, percebeu-se, como contraponto, a redução de sua qualidade, o que começou a causar doenças (ROUMIEH, 2017; DILGUERIAN, 2005; GIODA; AQUINO NETO, 2003; BRICKUS; AQUINO NETO, 1999). A banalização do Estilo Internacional, traduzida na construção de caixas de vidro em edifícios hermeticamente fechados, foi repetida em cidades de todo o mundo, sob a crença de que sistemas de climatização são suficientes para garantir a qualidade ambiental, em vez de adotar-se

sistemas passivos tanto quanto possível, o que é mais adequado do ponto de vista da sustentabilidade (GONÇALVES; DUARTE, 2006).

Um fato importante, que influenciou os rumos desta disciplina, ocorreu no ano de 1976 durante a Convenção da Legião Americana, realizada no hotel Bellevue Stradford, na Filadélfia, Estados Unidos. Nesse evento havia cerca de 4000 veteranos e, no segundo dia, muitos apresentaram sintomas de pneumonia, como tosse e febre. O microorganismo responsável foi a bactéria *Legionella pneumophila*, cuja proliferação ocorreu por meio de gotículas de água dispersadas pelo ar. Tal fato resultou numa tragédia em que cerca de 200 pessoas foram contaminadas com a doença e 34 morreram (DEUTSCHE WELLE, 2020).

No Brasil, houve a morte do Ministro das Comunicações Sérgio Motta, com causa atribuída também à *Legionellose* (pneumonia causada pela bactéria legionella). A contaminação se deu por meio do ar-condicionado de seu gabinete. Este ocorrido ensejou a publicação de normativas nacionais (BENSOUSSAN, 2017; DIÁRIO DO NORDESTE, 2005; FOLHA DE S. PAULO, 1998).

Outro ponto marcante foi a definição de Síndrome do Edifício Doente (SED). Esse termo, que foi bastante difundido na mídia e em trabalhos acadêmicos, se refere à manifestação de sintomas ou problemas de saúde relacionados à utilização de uma edificação (HESS-KOSA, 2019; EPA, 1991). Alguns autores consideram o nome inadequado por qualificar a construção, um objeto, como doente. Na verdade, tratam-se de sintomas que podem indicar o desenvolvimento de patologias (DILGUERIAN, 2005). Estudiosos chegaram a separar SED – em inglês: *SBS – Sick Building Syndrome* – e Doenças Relacionadas a Edifícios (DRE) – em inglês: *BRI – Building Related Illness*. O primeiro termo se caracterizaria pelo agravamento da saúde por meio de sintomas transitórios e desconhecidos, enquanto o segundo se constituiria por doenças verdadeiras (e não somente sintomas), como asma ou infecções (CARMO; PRADO, 1999; EPA, 1991).

Os principais sintomas da SED são: irritação da membrana mucosa da garganta, nariz e olhos, náuseas, dor de cabeça, fadiga, falta de concentração. São verificados enquanto ocorre a utilização do edifício pois, ao sair do local, ocorre a diminuição ou desaparecimento dos mesmos (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009; DILGUERIAN, 2005; GIODA; AQUINO NETO, 2003; GODISH, 2000; EPA, 1991). Para caracterizar a SED, basta que se manifestem em torno de 20% das pessoas (SCHIRMER, *et. al*; 2011). Sobretudo, a baixa qualidade do ar no interior das

edificações se constitui o aspecto de maior relevância entre os causadores do problema (DILGUERIAN, 2005).

Segundo Schirmer (2011) e Godish (2000), entende-se que o escopo de estudo da disciplina Qualidade do Ar Interior (QAI) abrange as áreas não industriais, como locais de serviço e comércio, ambientes educacionais, cinemas, igrejas, habitações e espaços de saúde.

Atualmente, entende-se que a Qualidade do Ar Interior é uma disciplina inserida num contexto mais amplo, que envolve outros fatores ambientais característicos da Qualidade Ambiental Interior (em inglês: *Indoor Environmental Quality – IEQ*). A QAI compõe o conjunto, ao lado de disciplinas como Conforto Térmico, Conforto Acústico e Conforto Visual (AKANMU; NUNAYON; EBOSON, 2020; KARAPETSIS; ALEXANDRI, 2016; SARBU; SEBARCHIEVICI, 2013).

A qualidade do ar em ambientes internos, nas últimas décadas, tem se tornado um assunto de grande importância nos estudos da Qualidade do Ambiente nas edificações. Esta preocupação se deve à constatação de que, nestes espaços, o ar pode ser muitas vezes mais poluído do que no próprio meio externo, sendo por isso potencial causador de sérios males à saúde (PAGEL, 2016).

Para o presente estudo, adota-se o conceito de Qualidade do Ar Interior enunciado pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2003), como “condição do ar do ambiente interno, resultante do processo de ocupação de um ambiente fechado com ou sem climatização artificial” de forma que, ao ultrapassar determinados parâmetros de qualidade, tem-se uma situação de desequilíbrio.

2.2 Qualidade do ar interior em salas de aula

Essa subseção trata das possíveis consequências à saúde dos usuários em ambientes internos devido à baixa qualidade do ar, da ventilação natural em salas de aula, como também das características de ocupação desses espaços.

2.2.1 Efeitos a saúde

"A poluição do ar [...], as condições de vida e as condições precárias de saneamento básico aumentam a suscetibilidade a doenças infecciosas agudas, asma e pneumonia [...]" (WARD; WARD; LEICH, 2012, p.53).

A qualidade do ar em ambientes internos - não industriais; não foi considerada como um problema ambiental por muito tempo. Essa ótica mudou com a descoberta dos problemas devido ao radônio (década de 1960), ao formaldeído, aos ácaros, bem como da Síndrome do Edifício Doente (década de 1970) e das alergias e demais doenças causadas por diversos poluentes nas décadas seguintes (SUNDELL, 2004).

Há registros, por exemplo, de pesquisas de qualidade do ar em escolas realizadas no século XIX por Elias Heyman (1829-1889), o primeiro professor de higiene no Instituto Karolinska (Suécia). Ele conduziu um estudo em escolas e observou concentrações máximas de CO₂ atingindo de 1500 a 3000 ppm para ambientes com ventilação e superiores a 5000 ppm para os sem ventilação (SUNDELL, 2004). Entretanto, nesta época, e por muitas décadas seguintes, os estudos da QAI visaram a redução de odores corporais e o conforto (EPA, 1991; SUNDELL, 2004).

Segundo Sundell (2004), a incidência de asma e alergia aumentou a partir da década de 1970 em virtude de mudanças ambientais. No mundo, estima-se que mais de 339 milhões de pessoas tiveram asma em 2016, e 417.918 dos casos resultaram em mortes pela doença (WHO, 2020). No Brasil, dados de 2015 informam que 22,4% dos estudantes de 13 a 15 anos e 21,4% de 13 a 17 anos tiveram sintomas, como chiado no peito, num horizonte de 12 meses. Além disso, 16% (13 a 15 anos) e 15,8% (13 a 17 anos) desses jovens tiveram crise de asma alguma vez na vida (IBGE, 2015).

A asma é uma doença crônica não transmissível, caracterizada pela inflamação e estreitamento das vias aéreas pulmonares, cujos sintomas são a falta de ar, chiado no peito, tosse, entre outros. Os fatores de risco são uma combinação da natureza genética dos indivíduos com a exposição ambiental. Durante a crise, o revestimento das vias respiratórias incha, fazendo com que se estreitem e o fluxo de ar diminua. Como consequência ao desempenho dos estudantes, esta doença causa fadiga diurna, redução dos níveis de atividade e absenteísmo (WHO, 2020).

No ambiente escolar, a presença de uma variedade de poluentes ambientais pode atuar como gatilhos da asma. Gatilhos atuam no sentido de causar sintomas, um episódio ou mesmo a piora de um quadro de asma. Dentre eles, é possível citar: restos e excrementos de baratas e ácaros, mofo, produtos químicos, agentes de limpeza, partículas em suspensão, fumaça de escapamentos, entre

outros. Estes são alguns dos poluentes que podem afetar estudantes com asma em seu período na sala de aula (GINA, 2020; EPA, 2020; WHO, 2020).

Há outros, como pelos de animais, fumaça da queima do tabaco, madeira, lenha, carvão e gás de cozinha, que são de menor possibilidade em ambientes escolares em função do uso. Entretanto, em locais próximos ao tráfego de veículos, deve-se considerar ainda o dióxido de nitrogênio, que aumenta a reatividade brônquica, o que deixa as pessoas mais suscetíveis a doenças (EPA, 2020; GINA, 2020).

Além da asma, é sabido que a poluição atmosférica é um dos fatores de risco para a Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC), cujos tipos mais comumente conhecidos são a enfisema e a bronquite crônica. A DPOC se configura pela obstrução irreversível do fluxo de ar nos pulmões. A asma é um quadro reversível, por isso não se enquadra como uma DPOC (WARD; WARD; LEACH, 2012).

A DPOC se caracteriza por ser incurável e progressiva e, em 2015, foi causa da morte de 3,17 milhões de pessoas em todo o mundo, muito mais do que a asma. Em 2016, sua prevalência era de 251 milhões de casos globalmente. Os fatores de risco estão relacionados à fumaça do tabaco e muitos outros poluentes. Para essa pesquisa, entre os poluentes causadores das DPOC's, é relevante considerar a exposição a particulados, sejam eles oriundos do ambiente interior ou mesmo aqueles advindos do ar exterior (WHO, 2017).

A poluição do ar pode ter efeitos danosos também no sistema cardiovascular, podendo levar, inclusive, à morte. Estudos de séries temporais observaram associações com a mortalidade por problemas do coração em virtude da liberação, no sistema circulatório, de mediadores inflamatórios capazes de causar eventos cardíacos (ANDERSON, 2009).

Um estudo, feito na Grande Vitória⁴, monitorou as concentrações de poluentes do ar no ambiente urbano e comparou com ocorrências de problemas respiratórios por meio de registros em três hospitais da região. Seus resultados apontam que 64% dos casos de doença (5752, aproximadamente) em crianças de 0 a 12 anos ocorreram no inverno. Os autores encontraram associação significativa entre os eventos respiratórios e a ocorrência de SO₂ e MP₁₀, além de vários

4 Estado do Espírito Santo, Brasil

5 SO₂: dióxido de enxofre. MP₁₀ e MP_{2,5}: material particulado com diâmetros inferiores a 10 µm e 2,5 µm, respectivamente.

componentes químicos presentes no MP_{2,5}, que apresentaram risco às doenças respiratórias, como Si, S, Ti, Ni, entre outros. Este trabalho concluiu que o controle desses poluentes é fundamental para evitar o impacto na saúde respiratória das pessoas (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Outra pesquisa feita na região da Grande Vitória, identificou associação entre a concentração de material particulado fino e as ocorrências de atendimentos médicos por doenças respiratórias. Nesse estudo, calculou-se que o incremento de 44,2 µg/m³ na concentração deste poluente foi capaz de aumentar o risco de atendimento médico ou internação em 3,8% para exposição no mesmo dia e em 5,6% após seis dias, em crianças menores de 12 anos (NASCIMENTO *et al.*, 2017).

Os efeitos negativos à saúde advindos da baixa qualidade do ar interno dependem de uma série de fatores, como: a sensibilidade dos indivíduos, a duração da exposição, a concentração e, claro, o efeito específico do contaminante no organismo. Se o contaminante for um alergênico, poderá causar uma reação imediata e possíveis menores efeitos de longo prazo. Já no caso de contaminantes com alto risco de câncer, os danos podem surgir após anos de exposição, em vez de apresentar sinais imediatos (HESS-KOSA, 2019). Adiciona-se a isso a possibilidade de efeitos sinérgicos devido à combinação de diferentes substâncias. Mesmo inócuo ou de baixa toxidez quando isolado, o efeito de uma espécie de poluente pode ser acentuado na presença de outros tipos (NOWACKI; RANGEL, 2014).

Em se tratando da individualidade do ocupante, muitos fatores ou características podem influenciar sua sensibilidade, tais como: idade, pois são mais sensíveis crianças e pessoas na terceira idade; doenças prévias, inclusive genéticas; imunodeprimidos; fumantes; indivíduos com a pele seca, por essa permitir maior penetração de compostos químicos; entre outras (HESS-KOSA, 2019). Acrescenta-se que os efeitos dos contaminantes do ar interno atingem mais facilmente os asmáticos e alérgicos, por serem particularmente suscetíveis aos poluentes do ar (EPA, 2018).

Além disso, a poluição do ar pode ser um estresse adicional em pessoas que já possuem um histórico de doenças. Ela acrescenta outro fator a uma causalidade multifatorial da vulnerabilidade da saúde dos indivíduos (ANDERSON, 2009).

A qualidade do ar interior é um dos fatores do ambiente interno que possuem relação com o desempenho dos estudantes, bem como com a redução das

doenças relacionadas à poluição do ar, o que contribui para o aumento da participação e presença escolar (EPA, 2018).

A relação que o usuário tem com o ambiente no meio escolar difere significativamente da prática no contexto residencial. Nos lares as pessoas possuem algum grau de liberdade para empreenderem modificações e adequações ou mesmo para controlarem os espaços, enquanto que em ambientes não residenciais o mesmo não ocorre, sendo de responsabilidade e gerência de outros (GODISH, 2000).

Os estudantes normalmente frequentam ambientes planejados e controlados por terceiros. Por isso, os seus comportamentos adaptativos são mais limitados. O comportamento adaptativo se refere a ação do ocupante de um ambiente em adaptá-lo, modificá-lo ou controlá-lo, de modo a torná-lo confortável e salubre (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020).

A taxa de renovação de ar, a densidade ocupacional da sala de aula e o comportamento adaptativo dos ocupantes, bem como as taxas de geração de CO₂, são fatores intimamente relacionados à QAI (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020). Estes aspectos são abordados nos itens a seguir.

2.2.2 Salas de aula naturalmente ventiladas

A melhoria da qualidade do ar interior e, com isso, da saúde e do desempenho dos estudantes, é a razão para preocupação com a ventilação e renovação do ar em escolas (COLEY; BEISTEINER, 2002).

A palavra “ventilação” vem do latim *ventilatio*, que por sua vez quer dizer “estar exposto ao vento”. Nos ambientes internos das edificações, o objetivo é aproveitar os efeitos positivos da exposição ao vento, que além do conforto, promove a renovação do ar com objetivo de diluir ou remover poluentes e adequar a qualidade do ar interno (SUNDELL, 2004).

A renovação de ar num ambiente pela ventilação natural é resultado do diferencial de pressão entre os meios exterior e interior devido a ação dos ventos na edificação, e também pelo diferencial de temperatura do ar entre o ar interno e o exterior (AMARAL, 2008; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A ventilação também pode ser realizada por sistemas mecânicos que, além de promover a ventilação, concorrem para o aquecimento, arrefecimento ou climatização do ar interior no ambiente construído. Assim, nesses casos a renovação de ar é controlada, e com isso procura-se também uma maior eficiência energética

para a edificação. Por outro lado, observa-se que tradicionalmente, busca-se recircular o máximo possível do ar pré-existente no interior (MITCHELL; BRAUN, 2018).

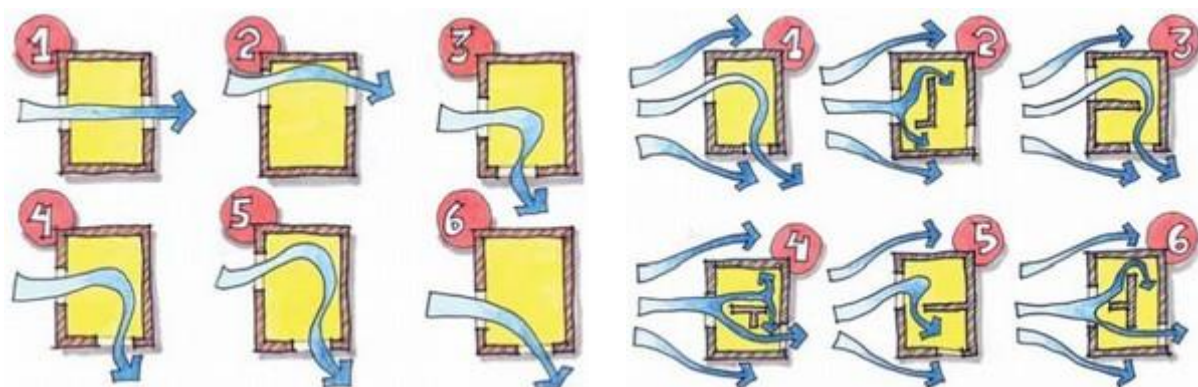
Muitos fatores devem ser considerados quando do estudo da renovação de ar, seja ela natural ou mecânica, pois há sempre a influência da qualidade do ar externo, devido as fontes externas de poluição, tais como: tráfego de veículos, e contaminação industrial no entorno. Estes fatores devem ser considerados no projeto para o dimensionamento e posicionamento de aberturas, saídas e tomadas de ar, bem como para decidir sobre a necessidade de uso de filtros de alta eficiência (KEELER; VAIDYA, 2018).

É sabido que na Arquitetura podem ser utilizados conhecimentos relativos ao clima e microclima para conseguir no ambiente construído a eficiência energética, condições de conforto e uma adequada qualidade do ar interno através de estratégias de ventilação. No campo da Arquitetura, do ponto de vista do Conforto Ambiental, a ventilação natural faz parte de um corpo de técnicas que se insere num contexto estratégico bioclimático mais amplo, que inclui, por exemplo, técnicas de sombreamento, de aproveitamento da iluminação natural, entre outras. Ou seja, são utilizadas estratégias passivas que, além do conforto, concorrem para um menor consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Espaços naturalmente ventilados se utilizam, para renovação de ar, dos sistemas de esquadrias e aberturas, tais como: portas, janelas, óculos, claraboias, lanternins, torres de vento, entre outros. A ventilação natural depende da orientação e implantação da edificação no terreno, bem como da topografia, da presença de vegetação e edificações ao redor, que influenciam o ângulo de incidência do vento e sua intensidade (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A ventilação cruzada no ambiente interno é proporcionada pela disposição de aberturas em paredes opostas, ou adjacentes, e se constitui uma das técnicas mais eficazes para o arejamento natural em ambientes internos (Figura 1). Depende de um estudo sobre a orientação da edificação e das aberturas em função dos ventos dominantes (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Figura 1 – Fluxo de ar pela ventilação cruzada em ambientes sem e com repartições

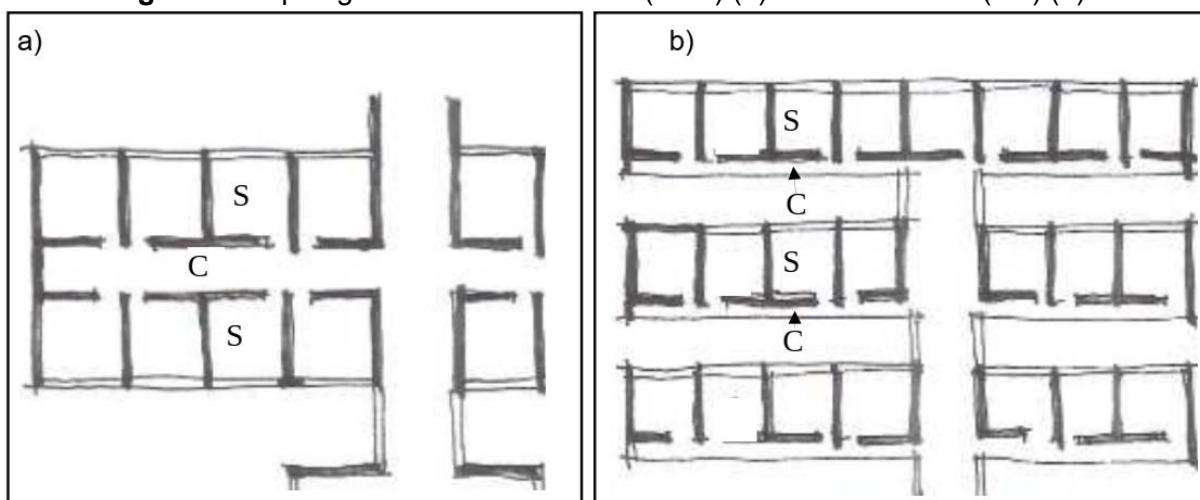


Fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014, p. 185

Outra técnica possível de ser utilizada é a ventilação noturna, ou ventilação estrutural, adotada para redução da temperatura interna do edifício à noite (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Para renovação de ar em alguns ambientes não residenciais, ela é conveniente por permitir a diminuição das concentrações de poluentes nos períodos de desocupação.

Em salas de aula, a ventilação muitas vezes é do tipo unilateral em vez de cruzada. Isso ocorre para se evitar a localização de janelas em paredes que fazem separação entre o ambiente de estudo e a circulação. Desta forma, evitam-se desconfortos de outra natureza, como o excesso de ruído, que prejudica a atenção e o desempenho dos estudantes. As plantas dos tipos sala-corredor e a sala-corredor-sala (Figura 2) são duas soluções comuns em escolas da atualidade (QUIRINO; PEREIRA; LEDER, 2019).

Figura 2 – Tipologias sala-corredor-sala (SCS) (a) e sala-corredor (SC) (b)



Fonte: adaptado de KOWALTOWSKI, 2011.

A área útil para ventilação de uma fenestração é fundamental, pois representa a porcentagem de abertura de uma esquadria efetivamente utilizada para ventilação e que depende do modelo de esquadria. Por exemplo, em janelas dos tipos guilhotina e de correr, com número par de folhas, obtém-se uma área útil de 50%, enquanto aquela do tipo “abrir” totaliza 100% de abertura. Já nos tipos basculante e maxi-ar, a porcentagem depende do ângulo de abertura, podendo variar de 13% a 100% (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

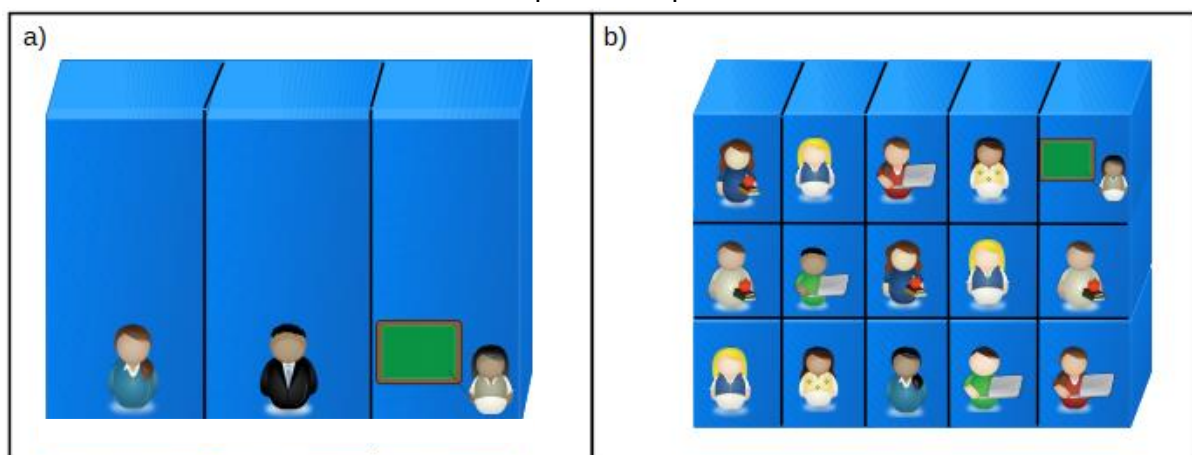
Korsavi *et al.* (2020), num estudo feito em escolas na Itália, constatou correlações significativas entre as áreas de aberturas de janelas e indicadores de qualidade do ar, como a concentração de CO₂ interno (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020). A pesquisa mostra que técnicas de dimensionamento de aberturas podem concorrer para uma vazão de ventilação e renovação de ar adequadas, bem como na escolha apropriada dos sistemas de ventilação a cada situação.

Em se tratando de ambientes naturalmente ventilados, não se deve considerar apenas o modelo, a posição e a quantidade adequada de janelas sem levar em conta os fatores relacionados à ocupação e ao comportamento adaptativo dos usuários. Mesmo que a janela apresente uma adequada área útil para ventilação, o comportamento dos ocupantes de abrir ou manter fechada afeta diretamente a qualidade do ar interior. Segundo Korsavi, Montazami e Mumovic (2020), além de esquadrias em quantidades adequadas, a maneira de utilização das mesmas é um importante fator de influência.

2.2.2.1 – Densidade ocupacional

A densidade ocupacional relaciona as dimensões da sala de aula com o número de ocupantes de duas formas (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020). A primeira, associa a quantidade de pessoas à área do piso interno e, a segunda, ao volume de ar interior. As unidades utilizadas são metro quadrado por pessoa (m²/p) e metro cúbico por pessoa (m³/p), respectivamente. A Figura 3 ilustra a distribuição do volume de ar de uma sala com uma mesma área, porém sob distintas densidades de ocupação. Para a sala hipotética, observa-se que há diferença no volume disponível de ar respirável quando ocupada por três pessoas, de outra situação com quinze ocupantes.

Figura 3 – Ilustra a distribuição do volume de ar de uma sala em diferentes densidades de ocupação: a) sala com volume V dividido por três usuários; b) o mesmo volume partilhado por 15 usuários.



Fonte: Elaborada pelo autor

A ocupação dos ambientes está diretamente relacionada ao aumento das concentrações de dióxido de carbono devido à geração própria dos usuários. Escolas se caracterizam pela possibilidade de manter altos níveis de ocupação por longos períodos do dia (ALMEIDA *et al.*, 2017).

Conforme a OECD (2016), a média de alunos por professor varia consideravelmente no mundo, sendo de aproximadamente 30 em países como Brasil, Colômbia, República Dominicana e México, e podendo ser de apenas 10 alunos por professor na Grécia, Malta, Bélgica, Polônia, entre outros países.

De acordo com levantamento realizado pelo INEP (2019), o indicador “média de alunos por turma da educação básica” revela, para o Ensino Médio, a quantia de 29,6 alunos por turma no Brasil, e de 30,2 alunos por turma se consideradas apenas escolas urbanas. Já no Estado do Espírito Santo e no Município de Vitória, os valores são 30,7 e 32,3, respectivamente.

Os artigos 3º e 4º da Lei de Diretrizes e Bases da Educação - LDB (Lei Federal nº 9394/96) citam a necessidade de “padrões de qualidade” como base para o ensino. Em adição, a Lei Federal nº 13005/2014, denominada Plano Nacional de Educação (PNE), estabelece em sua meta 7 a busca pela qualidade da educação básica. Também preconiza a colaboração entre a União e os entes federados na elaboração de parâmetros mínimos inclusive para a infraestrutura das escolas.

O Conselho Nacional de Educação emitiu o Parecer CNE/CEB nº 8/2010, que define os padrões mínimos de qualidade de ensino para a Educação Básica na esfera pública. Esse documento indica, para o ensino médio, entre outros fatores, a

quantidade de até 30 alunos por professor como uma relação adequada para o processo de ensino e aprendizagem, bem como área de 45 m² por sala de aula, considerando o número de estudantes informado⁶. Portanto, esse documento recomenda a densidade ocupacional de 1,50 m²/p, nessa idade escolar sem, contudo, considerar o volume de ar no interior do ambiente.

O objetivo do parecer é servir de futura referência para a elaboração dos Padrões Mínimos de Qualidade para a Educação Básica Pública do Brasil. Entretanto, são poucos parâmetros que não necessariamente garantem as adequadas condições do ar interno⁷.

2.3 Parâmetros ambientais e poluentes da QAI

Apresenta-se a seguir uma revisão bibliográfica sobre os parâmetros relacionados com o dióxido de carbono e poluentes, assim como material particulado e monóxido de carbono. Também são considerados referências normativas relacionadas com a temperatura e umidade em ambientes internos.

2.3.1 Dióxido de carbono

2.3.1.1 CO₂: definições

O dióxido de carbono (CO₂), também denominado gás carbônico, é um gás incolor, inodoro e sem sabor, e um dos constituintes da atmosfera. Sua concentração no ar externo pode variar segundo o local (tende a ser maior em áreas urbanizadas, por exemplo), tendo registros, em média, de aproximadamente 400 ppm (NOWACKI; RANGEL, 2014). Atualmente, esse gás compõe cerca de 0,03% da atmosfera da Terra, mas já foi responsável por cerca de 98% dela, obviamente quando o planeta não continha vida (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009). De acordo com análises realizadas em corpos de prova retirados do gelo da Antártica e da Groenlândia, a

6 O Parecer CNE/CEB nº 8/2010 também indica parâmetros para as categorias Creche, Pré-escola e Ensino Fundamental.

7 O Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) (autarquia federal a serviço do Ministério da Educação – MEC) possui, embora em desenvolvimento, o Manual de Orientações Técnicas para Elaboração de Projetos de Edificações Escolares. Este documento preceitua a ocupação máxima de 36 alunos por sala, a área recomendada de 1,50m² por pessoa, pé-direito mínimo de 2,70 m, além da relação mínima área de esquadrias de 1/5 da área do piso do ambiente para iluminação natural e 1/10 da área do piso para ventilação natural.

concentração deste gás permaneceu constante e próxima de 260 ppm desde a última era glacial (há 10.000 anos) até aproximadamente 300 anos atrás. Desde aproximadamente 100 anos, devido ao desmatamento e atividades antrópicas como a queima de combustíveis fósseis, indústria, agricultura e queima de biomassa, essa concentração tem aumentado gradualmente (SEINFELD; PANDIS, 2016).

O ciclo do carbono, um dos principais ciclos biogeoquímicos do planeta, inclui as diferentes formas de interação do dióxido de carbono com os seres vivos e com a superfície terrestre. As principais reações em que ocorrem a formação ou a modificação do CO₂ são a fotossíntese pelos vegetais, para formação da biomassa; a respiração, para produção de energia dos animais e as diversas formas de interação com água (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009).

Este gás é formado pela atividade metabólica dos animais, uma vez que, “na respiração celular (...), o CO₂ é eliminado e depois encaminhado para fora dos organismos pelo sistema respiratório (...)” (GIODA; AQUINO NETO, 2002, pág. 359). Também é oriundo da combustão completa de combustíveis fósseis e materiais orgânicos. Por isso, dentre as principais fontes externas estão as indústrias siderúrgica e cimentícia, além de queimadas, incêndios florestais e os motores de combustão interna.

Por exemplo, a indústria do cimento tem grande participação no lançamento de dióxido de carbono na atmosfera, sendo “... responsável por aproximadamente 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa e por aproximadamente 5% das emissões de CO₂”. A liberação desse gás ocorre ao longo de cadeia produtiva industrial, seja nas etapas de produção, transporte, uso de energia e processo de clínquerização (MAURY; BLUMENSCHNEIN, 2012, pág. 5).

Sabe-se que, além de afetar a qualidade do ar, a emissão de gases estufa na atmosfera, entre eles o dióxido de carbono, tem o potencial de aumentar a temperatura do planeta e causar alterações climáticas (SEINFELD; PANDIS, 2016).

No cotidiano das indústrias e cidades, liberam-se gases poluentes no ar. O dióxido de carbono, em 2016, alcançou um patamar considerado perigoso e irreversível a curto prazo. Nesse ano, o planeta Terra ultrapassou o marco simbólico da concentração deste gás na atmosfera, que era definido como 400 ppm. Sabe-se que o gás carbônico é um dos principais gases do efeito estufa, conforme informa a *World Meteorological Organization*, uma agência especializada da Organização das Nações Unidas – ONU (WMO, 2016).

Entretanto, o CO_2 é fundamental à vida, parte integrante dos processos de fotossíntese das plantas. A questão saber que efeitos e sob quais condições há ou não impactos negativos ao corpo humano. A eliminação de dióxido de carbono (CO_2) no ar, pelos seres humanos, é parte do processo de respiração pulmonar, pelo qual o ar é fornecido aos pulmões para realização de troca gasosa. Nesse órgão, o oxigênio (O_2) é dissolvido no sangue e o gás carbônico é devolvido para ser expelido de volta para o ambiente (BRITANNICA, 2019; WEST, 2013; WARD; WARD; LEACH, 2012).

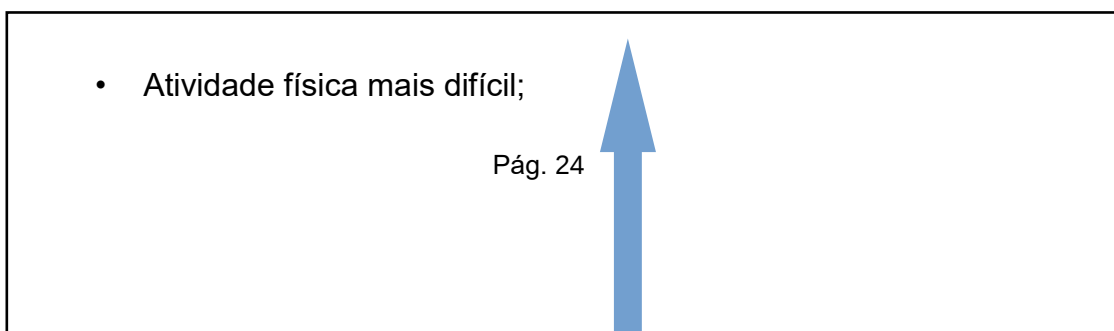
Após o O_2 ser transportado pelas hemácias ao longo do corpo humano, esse gás é aproveitado em outro processo: a respiração celular. Nele, o oxigênio é combinado com moléculas oriundas da digestão de alimentos, produzindo energia química necessária para a sustentação da vida. Com isso, são gerados “resíduos”: o dióxido de carbono e a água (BRITANNICA, 2020).

A respiração pulmonar está diretamente relacionada com as necessidades metabólicas do corpo (WARD; WARD; LEACH, 2012). Com o exercício físico, mesmo que moderado a médio, ela aumenta. Em pessoas mais jovens e em boa forma, a respiração pode alcançar cerca de 15 vezes o volume de repouso. Com este aumento, ocorre mais captação de O_2 e maior eliminação de CO_2 (WEST, 2013).

Em repouso, o volume respiratório gira em torno de 500 ml por pessoa, totalizando 7.500 ml/min.pessoa, em média (WARD; WARD; LEACH, 2012). O ser humano consome 250 ml/min de oxigênio e elimina 200 ml/min de dióxido de carbono, totalizando 12 l/h (STANFIELD, 2013). O Apêndice A apresenta maiores detalhes a respeito da fisiologia respiratória e sua relação com a QAI.

A pesquisa de Kapalo *et al.* (2019) comparou a geração de dióxido de carbono em estudantes ao desempenharem diferentes atividades, como: desenhar em silêncio, conversar sentado, conversar em pé, andar pela sala de aula, estresse durante avaliações, atividades físicas leves (levantar e baixar os braços, girar os quadris, etc) e atividades mais difíceis (correr no local, fazer agachamentos, etc). Os resultados mostraram que as concentrações de CO_2 subiram conforme se deu o aumento da intensidade das atividades, na ordem mostrada na Figura 4:

Figura 4 - Aumento gradativo da concentração de dióxido de carbono em ambiente interno em função das atividades realizadas pelos estudantes



- Atividade física leve;
 - Exame (avaliação escolar);
 - Andar e falar;
 - Andar pela sala;
 - Conversar em pé;
 - Desenhar em silêncio;
 - Conversar sentado.
- Aumento da
concentração de CO₂

Fonte: o autor (2022), com base em Kapalo *et al.* (2019)

Interessante observar que, na situação de exame (avaliação, prova), os autores observaram o aumento da concentração de CO₂, que inicia com valores mais baixos e ultrapassa gradualmente a maior parte das categorias de atividades, ficando muito próxima da atividade física leve. A pesquisa sugere que este aumento se deve ao nível de estresse envolvido (KAPALO *et al.*, 2019).

A geração de gás carbônico, pelos usuários, é bem conhecida na literatura em função da taxa metabólica e da idade (COLEY; GREEVES; SAXBY, 2007). Além de depender do nível de atividade, pois a intensidade de respiração traz consequências à quantidade de eliminação de CO₂, a expiração deste gás está relacionada também à alimentação:

"A relação de troca gasosa respiratória (R) corresponde à relação entre a produção de CO₂ e o consumo de O₂, conforme medição na boca. No estado estacionário, a produção de CO₂ e o consumo de O₂ refletem o metabolismo tecidual. A metabolização de carboidratos produz um volume de CO₂ igual ao volume de O₂ consumido, enquanto a metabolização de gorduras e proteínas gera um volume menor de CO₂ que o de O₂ consumido. Para uma dieta mista média, a [relação] R é $\approx 0,8$ " (WARD; WARD; LEACH, 2012, p. 27).

2.3.1.2 CO₂: relação com a renovação do ar

No século XIX, Pettenkofer (1818-1901) observou que o CO₂ era um indicador da quantidade de outras substâncias nocivas no meio interno e afirmou que o ar não era adequado se a concentração deste gás fosse superior a 1000 ppm (SUNDELL, 2004).

O dióxido de carbono tornou-se um importante indicador da QAI no sentido de uma menor concentração deste gás poder ser associada à boa ventilação e renovação de ar do ambiente e, conseqüentemente, à diluição de outros poluentes (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020; CARMO; PRADO, 1999). Altas concentrações de CO₂, em ambientes internos, sinalizam o baixo índice de renovação de ar e, potencialmente, o alcance de altos níveis de outros poluentes (ALMEIDA *et al.*, 2017; SATISH *et al.*, 2012). Contudo, não se deve eximir a investigação e preocupação referentes às outras possíveis fontes contaminantes.

Alguns autores, como Carmo e Prado (1999), consideram o gás carbônico um poluente “relativamente não tóxico”, pois seus efeitos nocivos mais graves demandam muito tempo de exposição contínua, da ordem de dias, para se manifestarem. Segundo eles, em situações extremas, grandes concentrações alteram a acidez do sangue, provocando aumento na taxa de respiração. O controle deste composto no organismo é realizado pelos rins e pelo metabolismo do cálcio, podendo a levar a processos de desmineralização dos ossos. Em níveis altíssimos, como 50.000 ppm, afeta o sistema nervoso, causando problemas visuais, cefaleia, tonturas e problemas cardiovasculares.

Elevadas concentrações de CO₂ ocasionam graves efeitos ao corpo humano: aos 30.000 ppm, respiração profunda e forte; aos 40.000 ppm, dores de cabeça, tonturas, alterações psíquicas; aos 50.000 ppm, numa exposição de 30 min a 60 min, risco de morte e, de 80.000 a 100.000 ppm, morte súbita (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2013).

Nos Estados Unidos, de acordo com a Lei do Ar Limpo (*Clean Air Act*) de 1970, o dióxido de carbono não é oficialmente considerado um poluente pelo fato de ser encontrado em concentrações baixas na atmosfera (KEELER; VAIDYA, 2018). Todavia, Anderson (2009) lembra do princípio enunciado por Paracelsus (século XVI), ao dizer que nenhuma substância é completamente não venenosa e que se trata de uma questão da dosagem. Ou seja, para o corpo humano, poluentes podem ser tóxicos ou seguros de acordo com as concentrações no momento da exposição.

Mesquita e Araújo (2006) ponderam que, pelo fato de a baixa renovação de ar nos ambientes internos tender a aumentar a concentração de CO₂ e diminuir a de oxigênio, isso pode afetar a capacidade de concentração dos usuários, uma vez que, para o bom desempenho e trabalho do cérebro, é necessário um ambiente com altas

taxas de oxigênio a fim de suprir a demanda causada pela atividade cerebral e pelo metabolismo.

Assim como pequenas concentrações de poluição do ar podem causar danos à saúde (ANDERSON, 2009), cabe examinar se “pequenas” doses de CO₂, tradicionalmente consideradas inofensivas, também são capazes de causar algum tipo de prejuízo aos ocupantes de um determinado espaço interno. O princípio de Paracelsus parece se aplicar ao gás carbônico e o exame de pesquisas recentes ajudam a compreender o problema.

De maneira conservadora, tem-se assumido que as altas concentrações de dióxido de carbono não causam prejuízos aos ocupantes e que, na verdade, são indicadores da presença de outros poluentes causadores de efeitos adversos (ALMEIDA *et al.*, 2017; SATISH *et al.*, 2012).

Essa problemática levou Satish *et al.* (2012) a realizarem um estudo que avaliou as respostas de participantes dentro de uma câmara ambiental com condições controladas, como estanqueidade, temperatura, taxa de ventilação, etc. Foi aplicado um teste de performance da tomada de decisão, desenvolvido para avaliar o funcionamento cognitivo complexo, com duração de 2,5 horas e com auxílio de computador. No ambiente, a concentração de CO₂ foi estabelecida em três patamares: 600, 1000 e 2500 ppm. Ao final, a pontuação média resultou entre 44 e 94% mais baixa quando, no teste, os participantes foram submetidos à concentração média de 2500 ppm. As pontuações foram significativamente inferiores no maior nível de CO₂ para as variáveis: atividade básica; atividade aplicada; orientação; iniciativa; uso da informação; amplitude de abordagem e estratégia básica, que foram algumas das categorias avaliadas no teste cognitivo (SATISH *et al.*, 2012).

Segundo os autores, estas descobertas fornecem evidências, inclusive, para considerarem o dióxido de carbono como um poluente do ar interior e não somente como indicador. Além disso, declaram haver confirmações de que, em escolas, as concentrações deste gás estão frequentemente perto ou acima dos níveis associados à pesquisa, podendo ocasionar reduções significativas no desempenho dos estudantes, o que sugerem levar a prejuízos tanto no momento do aprendizado quanto na realização de testes (SATISH *et al.*, 2012).

A pesquisa de Shendell *et al.* (2004), realizada em escolas de Washington e Idaho, nos Estados Unidos, encontrou associações entre a frequência dos alunos e a concentração de gás carbônico. Os resultados apontam que o aumento em 1000

ppm entre os níveis interno e externo correspondeu à elevação de 10 a 20% nas ausências dos estudantes.

O trabalho de Coley, Greeves e Saxby (2007) concluiu que o poder de atenção e a capacidade de concentração de crianças são significativamente piorados quando são submetidas a altos níveis de CO₂ em salas de aula, o que acarreta prejuízos ao processo de aprendizagem. Além disso, pesquisa realizada em Nova Iorque por Muscatello *et al.* (2014) relacionou significativamente altas taxas de gás carbônico (acima de 1000 ppm) em salas de aula com o aumento de sintomas psicofisiológicos nos professores, como dor de cabeça, fadiga e dificuldade de concentração.

Muitos trabalhos têm demonstrado que a concentração de dióxido de carbono pode atingir valores muito acima do recomendável (1000 ppm). Um levantamento realizado por Coley e Beisteiner (2002), em escolas naturalmente ventiladas do Reino Unido, indicou a média de 1957 ppm nos períodos ocupados e máxima acima de 4000 ppm. A causa atribuída foi que o ar fresco não fora provido adequadamente não pela falta de janelas, mas pela sua não utilização adequada.

Após algumas horas de ocupação em salas de aula, mesmo que naturalmente ventiladas, a concentração de CO₂ pode crescer gradualmente até atingir picos acima dos limites recomendados (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020).

A elevação dos níveis de dióxido de carbono, em salas de aula, está relacionada a diversos aspectos prejudiciais que podem influenciar e prejudicar o processo de ensino e aprendizagem. Por exemplo, o aumento das concentrações de CO₂ está associado à diminuição do desempenho na tomada de decisão (SATISH *et al.*, 2012) e do aprendizado (GABRIEL *et al.*, 2021). Relaciona-se também à redução do poder de atenção, de concentração e de participação (BOGDANOVICA; ZEMITIS; BOGDANOVICS, 2020; COLEY; GREEVES; SAXBY, 2007), além de influenciar o aumento do absenteísmo (SHENDELL *et al.*, 2004).

2.3.1.3 CO₂: utilização das aberturas e padrões de ocupação

Um estudo realizado por Deng e Lau (2019), nos Estados Unidos, indicou que, nos períodos de ocupação das salas de aula, a concentração média foi de 1171 ppm, com desvio padrão de 319 ppm, e que o nível máximo chegou a 2369 ppm. Em outra pesquisa realizada na Itália, Schibuola e Tambani (2020) obtiveram valores

semelhantes com nível médio de 1617 ppm e máximo de aproximadamente 3200 ppm para uma das salas analisadas, porém com variações consideráveis causadas pelo comportamento dos ocupantes na utilização das janelas, que nem sempre eram mantidas abertas, a depender da percepção do professor sobre a necessidade de ventilar o ambiente.

Diante destes fatos, realizou-se uma busca de mais evidências no Portal de Periódicos da CAPES⁸, com uso de acesso remoto ao conteúdo assinado por meio da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). Recorreu-se a buscas com a combinação de termos em inglês: *IAQ, indoor air quality, school, natural ventilation, naturally ventilated*. Após a leitura dos títulos e resumos de todos, foram selecionados os trabalhos que relacionavam as concentrações de dióxido de carbono com questões de desempenho, saúde ou comportamento adaptativo dos usuários, em salas de aula naturalmente ventiladas. Os estudos analisados são apresentados a seguir.

Korsavi *et al.* (2020) enfocou as escolas naturalmente ventiladas do Reino Unido, apresentou médias diárias de CO₂ superiores a 1000 ppm em 55% dos ambientes e registros de ultrapassagens de 1500 ppm em 10% dos casos. Também considerou na operação de janelas como principal comportamento adaptativo no intuito de prover adequada ventilação, já que 44% das salas apresentavam alto potencial para esta boa prática, pois a abertura permite a renovação de ar e a diminuição da concentração de gás carbônico. Além disso, identificaram que a abertura das janelas pelos professores foi influenciada principalmente pelo desejo de se evitar o desconforto térmico e não pela percepção de uma piora na qualidade do ar (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020). Porém, com a abertura das esquadrias durante os intervalos, obteve-se redução de dióxido de carbono, uma vez que, em pausas curtas (20 min), houve diminuição à taxa de 8 ppm/min e, em intervalos maiores (50min), conseguiu-se um decréscimo de 9 ppm/min. Apesar destes efeitos, sugerem que este procedimento é insuficiente para reduzir a concentração de CO₂ a ponto de atender aos limites normativos até o fim das atividades do dia. Observaram também que a variação da densidade ocupacional, medida em m²/p, acarretou alterações nos níveis de dióxido de carbono uma vez que

O Portal de Periódicos da CAPES: <http://www-periodicos-capes-gov-br.ez120.periodicos.capes.gov.br/>
Acesso em: 09 nov. 2020.

maiores ocupações potencialmente influenciaram para aumentar as médias deste gás (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020).

Dorizas *et al.* (2015) chegou a conclusões semelhantes em escolas naturalmente ventiladas em Atenas, Grécia, ao verificar que o aumento das taxas de ventilação durante os intervalos teve como consequência a redução de concentrações de gás carbônico, bem como identificou estatisticamente relações positivas entre o número de alunos ao aumento de CO₂ (DORIZAS; ASSIMAKOPOULOS; HELMIS; SANTAMOURIS, 2015).

Lazovic *et al.* (2015) encontrou níveis superiores a 1000 ppm regularmente durante os períodos de aula na Sérvia, bem como máximas que chegaram a 2200 ppm, aproximadamente, em região urbana e 4500 ppm em rural. Os autores relacionam os altos valores às baixas taxas de ventilação, inferiores à taxa de 7 l/s/p (litros por segundo por pessoa), valor recomendado pelas normas desse país. Almeida *et al.* (2017) monitorou, em diversos ambientes naturalmente ventilados em escolas de Portugal, médias superiores a 1000 ppm e máximas que ultrapassaram a marca de 3000 ppm em oito escolas, com episódios ainda acima de 4000 ppm em outras quatro escolas.

Mumovic (2009) investigou 14 salas naturalmente ventiladas da Inglaterra em que 12 delas apresentaram médias superiores a 1000 ppm (e outras duas acima de 930 ppm), com máximas superiores a 2500 ppm (em 12 salas), com registro de 4016 ppm numa sala e de 5567 ppm em outra.

Tran *et al.* (2015) monitorou duas salas de aula, uma localizada em zona industrial e outra em região urbanizada na França. Relaciona os altos níveis médios de gás carbônico (1475 ppm; 1485 ppm) medidos às baixas taxas de ventilação, com médias de 10,08 m³/h/p (metros cúbicos por hora por pessoa) e 7,92 m³/h/p, durante os horários de aula, valores abaixo dos parâmetros da ASHRAE (18 m³/h/p). Durante os intervalos, as trocas de ar aumentaram, mesmo com as salas fechadas, pois eram frequentemente (e aleatoriamente) abertas. Mesmo com estes momentos de abertura ao longo das pausas, ao retornarem no período vespertino, os usuários reiniciaram suas atividades sob concentrações ainda mais altas que o valor de 1000 ppm.

Diversos trabalhos, em diferentes países, relataram concentrações de dióxido de carbono acima dos parâmetros de qualidade, como: na Espanha (BECERRA *et al.*, 2020); em Kosice, Eslováquia (VILCEKOVÁ *et al.*, 2017); na França (RAMALHO *et al.*, 2015); na Índia (JAN *et al.*, 2017); na Croácia (BRDARIĆ *et al.*,

2019); entre outros. A Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa das concentrações de CO₂ encontradas em diversos estudos.

Tabela 1 – Concentrações de dióxido de carbono e taxas de ventilação em salas de aula naturalmente ventiladas, durante períodos de ocupação (períodos de ensino).

Local	Período/ n° escolas, n° salas de aula.	Densidade ocupacio- nal (média)	Concentração de CO ₂ (ppm)			Taxa de Ventila- ção média l/s/p	Referências
			Mín	Média	Máx		
Cassino, Itália	03 escolas 06 salas	2,49 m ² /p 8,81 m ³ /p	500 (prim.) 572 (inv.)	908±330 (primavera) 2206±696 (inverno)	1600 (primavera) 5500 (inverno)	–	FUOCO <i>et al.</i> , 2015
Cassino, Itália	Estações quente e fria. 05 salas.	2,49 m ² /p 7,85 m ³ /p	-	1832 (1503-3130)	>5000	–	STABILE <i>et al.</i> , 2017
norte da Itália	03 salas	1,95 m ² /p 7,13 m ³ /p	-	2100	>5000	–	SCHIBUOLA; SCARPA; TAMBANI, 2016
próximo a Treviso, Itália	4 salas	2,07 m ² /p 6,32 m ³ /p	–	1406,25	± 3000	–	SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020
Reino Unido	Estações quente e fria. 15 e 14 salas respectiva- mente.	2,12 m ² /p 6,23 m ³ /p	475 555	1087 (quente) 1224 (fria) 1155 (total)	3360 2269	–	KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020
Chipre	04 salas	2,33 m ² /p 7,47 m ³ /p	377	877-1604	3239	–	HERACLEOUS; MICHAEL, 2019
Seul, Coreia	116 escolas	3,02 m ² /p –	678	827	988	–	YANG <i>et al.</i> , 2015
Baltimore, Estados Unidos	16 escolas	–	–	898	–	–	MAJD <i>et al.</i> , 2019
Vel'ký Biel, Eslová- quia	02 salas	–	705	1326,5	1709	–	HARCAROVÁ, 2020
Kosice, Eslová- quia	–	5,57 m ² /p (inverno) 6,38 m ² /p (verão)	–	1315,88 (inverno) 1094,62 (verão)	1780 (inverno) 1500 (verão)	–	VILCEKOVÁ <i>et al.</i> , 2017
Pune, Índia	4 salas 2 escolas	0,90 m ² /p 4,54 m ³ /p	–	1249,11	± 1800	–	JAN <i>et al.</i> , 2017
França	896 salas	–	404 (ver.)	1044 (verão)	1252 (verão)	–	RAMALHO <i>et al.</i> , 2015

			465 (inv.)	1320 (inverno)	2690 (inverno)		
França	02 semanas em 02 escolas 02 salas	2,27 m ² /p 8,37 m ³ /p	410	1480	3490	2,5 l/s/p	TRAN <i>et al.</i> , 2015
Islamabad e, Paquistão	04 salas de aula Mar. a jun. de 2017	—	400	688,43 ^a	2444	—	ASIF; ZEESHAN; JAHANZAIB, 2018
Daugavpils, Letônia	1 sala	1,57 m ² /p 4,78 m ³ /p	—	1485,08	± 2500	—	BOGDANOVICA; ZEMITIS; BOGDANOVICS, 2020
Pequim, China	02 escolas	—	400 465	1285-1659 (janelas fechadas) 756 (janelas abertas)	3000 1153	1 l/s/p 7,54 l/s/p	HOU; LIU; LI, 2015
Tai'an, China	04 escolas	1,73 m ² /p 6,03 m ³ /p	476	1507,25	4692	—	PENG; DENG; TENORIO, 2017
Shenyang, China	01 escola. 03 salas de aula	1,52 m ² /p 4,85 m ³ /p	374	1510-3863 (médias diárias)	5000	1,652 l/s/p	MA; ZHAN; XU, 2019.
Wuhan, China	4 salas	—	500	1306,25	11231	—	CAI <i>et al.</i> , 2015
New Assiut, Egito	13 salas 2 escolas	—	—	497	—	—	ABDALLAH, 2017
Gliwice, Polônia	04 escolas Inverno	10,16 m ³ /p	—	>1000ppm a mais que o ar externo	—	—	MAINKA, A.; ZAJUZ-ZUBEK, E., 2015
Sérvia	02 escolas (A e B)	2,46 m ² /p	—	1396,44 (inverno) 1009,21 (primavera)	3700	—	LAZOVIC <i>et al.</i> , 2016
Cozani, Grécia	03 escolas 09 salas	2,95 m ² /p 8,79 m ³ /p (medianas)	—	—	—	1,05 l/s/p	KALIMERI <i>et al.</i> , 2016
Atenas, Grécia	Primavera 09 escolas	2,41 m ² /p 7,48 m ³ /p	538	1228	5049	7,51 l/s/p	DORIZAS <i>et al.</i> , 2015
Croácia	60 salas 20 escolas	—	500,56	1870,56	5384	—	BRDARIĆ <i>et al.</i> , 2019
Putrajaia, Bandar Baru Bangi, Malásia	3 salas	—	439	502	684	—	RAZALI <i>et al.</i> , 2017

sudoeste da Nigéria	15 salas 5 escolas	–	309	452,8	4229	–	TOYINBO <i>et al.</i> , 2019
Coimbra, Portugal	–	–	390 (prim.) 374 (inv.)	1927 (inverno)	2250 (primavera) 4640 (inverno)	–	PEREIRA; CARDOSO; SILVA, 2015
Viseu, Portugal	Primavera, Outono. 08 escolas	2,0 m ² /p 6,0 m ³ /p	–	1701,63	4270	–	ALMEIDA <i>et al.</i> , 2017
Porto, Portugal	71 salas 20 escolas	–	–	> 1000	–	–	GABRIEL <i>et al.</i> , 2021
Lisboa, Portugal	4 salas 1 escola	2,08 m ² /p 6,23 m ³ /p	–	–	–	6 – 8 l/s	DUARTE; GOMES; RODRIGUES, 2017
norte de Portugal	10 salas	1,91 m ² /p	531	1183,5	6096	–	BRANCO <i>et al.</i> , 2015
Cidade Real, Espanha	19 salas	2,15 m ² /p	379	618	2117	–	VILLANUEVA <i>et al.</i> , 2021
Espanha	18 salas	2,59 m ² /p (infantil) 2,11 m ² /p (adolesc.)	–	1530	3284 (infantil) 5366 (adolesc.)	–	BECERRA <i>et al.</i> , 2020

Fonte: o autor (2022)

Pesquisa realizada em Shenyang, na China, apontou taxas de ventilação muito baixas (médias de 1,291, 1,741 e 1,925 L/s/p) durante o período ocupado (de 32 a 38 alunos e de 1,45 a 1,65 m²/p) e, ao mesmo tempo, altas concentrações de CO₂ em três salas, chegando a máximas de 5000, 4982 e 3736 ppm. Nos três ambientes foi superado o valor de 1080 ppm em 93,94%, 99,05% e 100% dos valores registrados, bem como ultrapassaram o nível de 2500 ppm em 50%, 48% e 60% das vezes. Os valores significativamente altos das concentrações de gás carbônico foram relacionados à alta quantidade de alunos em sala de aula, quando alcançavam a lotação de 30 e 25 alunos, e a diminuição dos níveis do gás foi associada ao tempo de abertura das janelas (MA; ZHAN; XU, 2019).

A relação significativa entre a quantidade de dióxido de carbono e a utilização das esquadrias é reforçada pelos resultados de outra pesquisa realizada em Pequim (HOU; LIU; LI, 2015), na China, em que foram comparados valores medidos em salas de aula que utilizaram janelas/portas abertas ou fechadas, de modo que nesta última situação, também alcançaram concentrações de CO₂ acima do padrão

da ASHRAE, de 1080 ppm quando as salas alcançavam a lotação de 25 e 30 alunos, com taxas de ventilação menores que 1 L/s/p.

Ma, Zhan e Xu (2019) revelam através de questionários aplicados que o ar foi considerado fresco (renovado) numa significativa maioria dos votos (68,4%, 71,9% e 69,4%). Foi observado que a principal razão para as altas concentrações é a baixa taxa de ventilação devido à pouca frequência das janelas abertas. Conforme dados, em 99% do tempo a taxa de ventilação foi insuficiente (abaixo do valor de referência da China, que é de 5,56 L/s/p). Em virtude da discordância entre a medição e as respostas, os autores sugerem a adaptabilidade dos usuários ao ar ambiente. Por isso, apesar de estatisticamente as aberturas terem sido realizadas com objetivo de melhorar a qualidade do ar, o fato de a maioria julgá-la satisfatória diminuiu a possibilidade deste comportamento adaptativo. Com isso, as autoras concluíram que o controle das aberturas das esquadrias não deve ser baseado no julgamento subjetivo dos usuários.

Mainka e Zajusk-Zubek (2015) realizaram pesquisa em escolas naturalmente ventiladas da Polônia. Verificou-se que em 91% do tempo o ar se encontrou com baixa qualidade, correspondendo à classificação IDA4, atribuída quando a diferença de concentração de CO₂ entre o interior e o exterior é maior que 1000 ppm de acordo com a norma PN-EN 13779/2008, utilizada como parâmetro neste estudo. As autoras relataram que esta situação foi frequente durante o monitoramento, o que indica a baixa eficiência da ventilação. Sugerem a aplicação de um indicador integrado para classificar os locais com base na QAI para estimar o impacto nas atividades dos alunos e auxiliar ações de gestão.

Fuoco *et al.* (2015), no estudo desenvolvido em Cassino, Itália, concluíram que o mecanismo de ventilação não foi eficiente, pois o arejamento, mesmo em longos períodos, foi insuficiente para manter a boa qualidade do ar ao longo do dia. Constataram que o dióxido de carbono atingiu altos níveis enquanto as janelas foram mantidas fechadas. Nos momentos em que as esquadrias permaneceram abertas, houve diminuição dos níveis de CO₂, porém com a desvantagem do aumento de particulados nos ambientes internos.

Corroboram com este resultado as conclusões de Dorizas *et al.* (2015), ao identificar que, embora as taxas de ventilação em geral tenham sido satisfatórias, mediu-se altos níveis de particulados nos períodos de aula, apesar de que, neste caso, as causas foram relacionadas a fontes internas (DORIZAS; ASSIMAKOPOULOS;

HELMIS; SANTAMOURIS, 2015). Em contrapartida, Lazovic *et al.* (2015) observaram que a inadequada ventilação foi responsável tanto pelo aumento das concentrações de CO₂ quanto de material particulado.

Uma constatação interessante foi obtida numa pesquisa produzida na Dinamarca, que comparou as concentrações de gás carbônico em salas de aula com diferentes tipos de ventilação nas temporadas de não aquecimento) e de aquecimento. Em janelas manualmente ventiladas as concentrações de CO₂ foram superiores às demais categorias, com médias de 803 ppm e 1458 ppm para temporadas fria e quente, respectivamente. Na mesma ordem, as salas que utilizaram janelas automaticamente operadas obtiveram médias de 732 ppm e 1079 ppm; as salas com janelas automáticas e sistema extra de exaustão apresentaram 662 ppm e 942 ppm, e as mecanicamente ventiladas obtiveram os melhores resultados no quesito média de CO₂: 619 ppm e 757 ppm (GAO; WARGOCKI; WANG, 2014).

Gao *et al.* (2014) observaram ainda que a rotina de grandes intervalos no período matutino causou flutuações nas concentrações de CO₂. Além disso, no que diz respeito à percepção dos usuários, houve melhores avaliações nos ambientes com janelas automáticas e sistema de exaustão nos quesitos “ar fresco”, “qualidade do ambiente”. Neste ambiente, sintomas relacionados à saúde foram significativamente menores do que os percebidos na sala mecanicamente ventilada, que também foi a que apontou a pior percepção da qualidade do ar pelos alunos. Sugerem que as diferenças na prática de abertura das janelas indicam que esta ação são influenciadas, em grande parte, pelos hábitos dos ocupantes, que visam, entre outros aspectos, o seu conforto térmico (GAO; WARGOCKI; WANG, 2014).

A pesquisa de Ferreira e Cardoso (2013), realizada em Portugal, revela concentrações de diversos poluentes acima dos níveis recomendados deste país, que é de 1800 mg/m³ (aproximadamente 1000 ppm). Para o dióxido de carbono, obtiveram médias significativamente mais altas nas estações outono e inverno, em comparação com a primavera e verão. Os níveis médios de gás carbônico nos ambientes internos foram bem superiores aos valores externos. Algumas salas de aula chegaram a apresentar valores de concentrações três vezes acima dos recomendados. Indicam concluem que entre todos os poluentes verificados (dentre eles ozônio, material particulado, monóxido de carbono, formaldeído, dióxido de enxofre e dióxido de nitrogênio), o CO₂ foi o que apresentou resultados significativos para a saúde dos

estudantes, que estavam expostos a médias acima do valor de referência em 84% das escolas analisadas.

Com relação às escolas predominantemente urbanas, detectou-se uma relação estatisticamente significativa entre altos níveis de gás carbônico e a falta de concentração dos estudantes (FERREIRA; CARDOSO, 2013), fato que é corroborado por outros autores, como Coley, Greeves e Saxby (2007) e de Muscatiello *et al.* (2014). As mesmas autoras acima identificaram que, apesar de ocorrer durante as aulas, a abertura de janelas não foi possível em alguns momentos devido a ruídos, chuva ou outras situações. Por fim, ressaltam a importância de sistemas de renovação de ar eficazes e a alteração de comportamentos concernentes ao uso das esquadrias (FERREIRA; CARDOSO, 2013).

Num estudo desenvolvido em escolas localizadas em pequenas cidades perto de Veneza, na Itália, foram encontrados valores extremamente elevados para concentração de CO₂, cuja causa foi relacionada à abertura insuficiente das janelas para o fornecimento de ventilação adequada. Entre as instituições pesquisadas, observou-se bastante diversidade de utilização das esquadrias. Os autores pontuam que 15 salas de aula se enquadraram na categoria IV da norma EN15251, com valores maiores que 800 ppm de diferença em relação à concentração externa de dióxido de carbono. Dentre as demais, 09 (nove) salas ficaram na categoria III (diferença <800 ppm), 02 na categoria II (diferença < 500 ppm) e 02 ambientes na categoria I, com diferença <350 ppm (DE GIULI; DA POS; DE CARLI, 2012).

No mesmo estudo, apesar dos valores inadequados aos padrões, uma porcentagem considerável dos usuários não reclamou da qualidade do ar interno. Em uma das escolas, 24% das respostas dadas em questionários sobre percepção da QAI, revelaram que os professores realizavam abertura das esquadrias durante os intervalos, o que resultou em concentrações menores de dióxido de carbono. O trabalho conclui que os estudantes aceitam mais passivamente o controle da sala de aula, que fica sob a responsabilidade dos professores e que, para evitar um julgamento subjetivo e aumentar a eficiência, sugere-se um sistema de gestão predial para garantir boa qualidade ambiental interna (DE GIULI; DA POS; DE CARLI, 2012).

A partir dos trabalhos analisados, observou-se que, frequentemente, as concentrações têm atingido médias superiores a 1000 ppm, enquanto as máximas múltiplas vezes maiores. Os trabalhos analisados fornecem evidências de que, mesmo em salas de aula naturalmente ventiladas, as concentrações internas de gás

carbônico podem apresentar fortes variações, o que se deve principalmente à baixa eficiência da renovação de ar e à influência do comportamento dos usuários.

A abertura de esquadrias, durante os intervalos, representou melhoria nas concentrações de CO₂. Porém, esta ação se mostrou ineficiente devido à sua irregularidade ou devido ao fato de que, por vezes, as pausas não foram suficientemente longas para obter reduções capazes de manter os níveis de dióxido de carbono aceitáveis de maneira duradoura.

Os resultados demonstraram que os níveis de CO₂ estão significativamente relacionados à renovação do ar, às áreas de abertura e à quantidade de pessoas. Porém o comportamento adaptativo dos ocupantes com relação à abertura de janelas, bem como os hábitos de utilização, podem influenciar sobremaneira na concentração de gás carbônico. O controle do uso das janelas exercido pelos professores deu-se mais devido a ruído, busca de conforto térmico ou de proteção contra chuvas.

As pesquisas evidenciaram também que o julgamento subjetivo dos usuários é insuficiente para detecção da má qualidade do ar interno e para servir como gatilho da ação de abertura de janelas, o que torna difícil o gerenciamento da qualidade do ar com eficiência baseado na opção do ocupante.

Por isso, alguns trabalhos concluem que são necessárias alterações físicas nos modelos de abertura e no posicionamento das janelas. Outros, que o sistema de ventilação natural controlado por pessoas não é eficiente para manter a boa qualidade do ar e sugerem uso de outros sistemas de renovação de ar mais eficazes. Os autores apresentam ainda soluções de natureza gerencial, como a conscientização dos usuários, adoção de métodos de controle e gerenciamento, de sistemas de gestão predial, entre outras opções.

Dessa forma, é possível que haja limitações na adoção do CO₂ como indicador de qualidade do ar, pois há casos em que o incremento da ventilação natural permite a diluição de poluentes, ao passo que facilita a entrada de contaminantes oriundos de fontes externas. Entretanto, é fato que pelos estudos analisados que, quanto maior for a taxa de ventilação no ambiente, menor será a concentração de gás carbônico. Assim, esse gás é tradicionalmente considerado como um indicador para a QAI, como valor de referência para boa renovação do ar, e auxiliar na manutenção de um ambiente saudável.

2.3.2 Temperatura do ar e umidade relativa do ar

Ao lado do dióxido de carbono são considerados como importantes para a qualidade do ar interior a temperatura do ambiente, a umidade relativa do ar, como também a velocidade de circulação do ar. As salas de aula, enquanto ambientes de trabalho, envolvem além dos alunos, os professores e demais profissionais envolvidos no processo de ensino (monitores, tradutores, entre outros), sendo regidas pela NR 17 – Ergonomia.

A atualização dessa Norma em 2021, considera para o conforto térmico, a faixa de temperatura adequada de 18 °C e 25 °C, embora específica apenas para ambientes climatizados (BRASIL, 2021). A nova versão deste regulamento, ao contrário das anteriores, não dispõe sobre a umidade relativa do ar ou a velocidade do vento.

Outra referência para esses parâmetros, ainda em vigor, é a Resolução RE nº 09, que indica valores recomendáveis para temperatura de bulbo seco, no verão, de 23 °C a 26 °C, e de 40% a 65% para umidade relativa para ambientes internos em geral. Para o inverno, as faixas recomendadas são de 20 °C a 22 °C e 35% a 65% (ANVISA, 2003).

Sabe-se da importância desses parâmetros nos estudos de qualidade do ar interior, pois a observância de padrões climáticos adequados concorre favoravelmente para o desempenho de atividades e para a saúde dos usuários (MÄHLMANN; SCOPEL; MARIANO, 2018).

2.3.3 Material Particulado

O termo Material Particulado (MP), também denominado, em geral, de particulados, aerossóis ou mesmo de aerodispersóides, se refere à matéria líquida ou sólida em suspensão no ar com tamanho microscópico ou submicroscópico, porém numa escala maior do que as moléculas. É um termo que abrange poluentes em uma grande variedade de origens, que vão desde a poeira, o fumo, os vírus, pólen, restos de insetos, esporos de fungos e até vapores. As fibras sintéticas ou naturais também podem se constituir em material particulado, inclusive o amianto e a lã de vidro (SEINFELD; PANDIS, 2016; NOWACKI; RANGEL, 2014; ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009; APA, 2009; BRICKUS; AQUINO NETO, 1999).

Para ser considerada uma partícula aerossol, é necessário integrar pelo menos duas moléculas. Uma pequena partícula com diâmetro de $0,01\mu\text{m}$ pode conter uma grande quantidade de moléculas, da ordem de 10^4 unidades. Já quando seu diâmetro é aproximadamente $1\mu\text{m}$, pode-se considerar aproximadamente 10^{10} moléculas (SEINFELD; PANDIS, 2016).

O material particulado pode ser produzido pela atividade industrial, pelo funcionamento e rolagem dos automóveis, pela queima de combustíveis fósseis, pela construção civil dentre muitas outras fontes (MORAES, 2006; ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009; NOWACKI; RANGEL, 2014).

“São diversas as atividades humanas que originam materiais particulados. Processos de combustão e industriais, uso de veículos que, além de emitir partículas pelo cano de descarga, suspendem poeira em estradas asfaltadas ou não, construções diversas [...] são exemplos mais comuns” (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009, p. 119).

Além das emissões diretas, as partículas ainda são originárias da condensação de gases ou pela sua transformação química, que leva à sua união e mudança para particulado (SEINFELD; PANDIS, 2016). Segundo Seinfeld e Pandis (2016), em áreas urbanas, os aerossóis são formados tanto por emissões primárias de indústrias, veículos de transporte e de origem natural quanto por processos de conversão gás-partícula, este último constituindo o grupo das partículas secundárias. Ainda, conforme estes autores, há possibilidade de encontrar grandes concentrações de partículas finas principalmente em locais próximos a vias de grande tráfego.

Se o destino das partículas for a deposição sobre as superfícies ou a suspensão no ar e passíveis de serem inaladas, isto é determinado pelo diâmetro do material (BRICKUS; AQUINO NETO, 1999). O tamanho dos particulados tem, portanto, influência no seu tempo de vida na atmosfera. Uma vez no ar, o tempo de residência define a média do tempo de vida do material em suspensão até que seja removido o que, usualmente, nas camadas mais baixas da troposfera, não excede algumas semanas (SEINFELD; PANDIS, 2016).

Um poluente atmosférico pode ser removido por dois processos básicos de remoção: a deposição seca e a deposição úmida. Na deposição seca, é transferido diretamente para as superfícies pelo assentamento por gravidade ou com auxílio do vento. Na deposição úmida, que geralmente ocorre em altitudes acima de 100 metros,

o poluente é removido ligado à água em processo de condensação, sob a forma de chuva, neve ou névoa (SEINFELD; PANDIS, 2016).

Os aerodispersóides podem ser transportados do ar externo para o interior das edificações. Também podem ser gerados dentro das construções. Nos ambientes internos, atividades como limpar, varrer, lavar pisos, entre outras são suficientes para emitir partículas no ar. O próprio atrito pela utilização dos objetos de mobiliário produz particulados. Além do mais, nestes espaços o ar pode conter aerossóis dos produtos de consumo cotidianos (MORAES, 2006). Apesar de não realizadas em salas de aula, o ato de fumar ou cozinhar também libera particulados (BRICKUS; AQUINO NETO, 1999).

Segundo Fenger (2009), mesmo que as partículas tenham sido identificadas como poluição há séculos, até a década de 1980, registrava-se o Material Particulado Total em Suspensão (MPTS). Ao considerar a massa total de partículas em suspensão tem-se, portanto, a MPTS, expressa em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ou $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009). Num determinado volume de ar, mesmo que a massa total de particulados seja insignificante, a quantidade de partículas pode ser muito grande. Atualmente, atribui-se o nome Partículas Totais em Suspensão (PTS) ao material com diâmetro inferior a $50\ \mu\text{m}$ (NOWACKI; RANGEL, 2014; SEINFELD; PANDIS, 2016).

Para os grupos de partículas de tamanho menor, atribui-se o termo $\text{MP}_{2,5}$ às que possuem diâmetro inferior a $2,5\ \mu\text{m}$ e MP_{10} para as que possuem diâmetro inferior a $10\ \mu\text{m}$. O MP_{10} compreende a faixa considerada de partículas inaláveis (ou grossas), que ficam retidas na parte superior do trato respiratório. Abaixo de $2,5\ \mu\text{m}$, estão as partículas finas (ou respiráveis), que podem ser carregadas até atingirem os alvéolos pulmonares (IEMA, 2019; SEINFELD; PANDIS, 2016; NOWACKI; RANGEL, 2014; ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009; QUADROS, 2008).

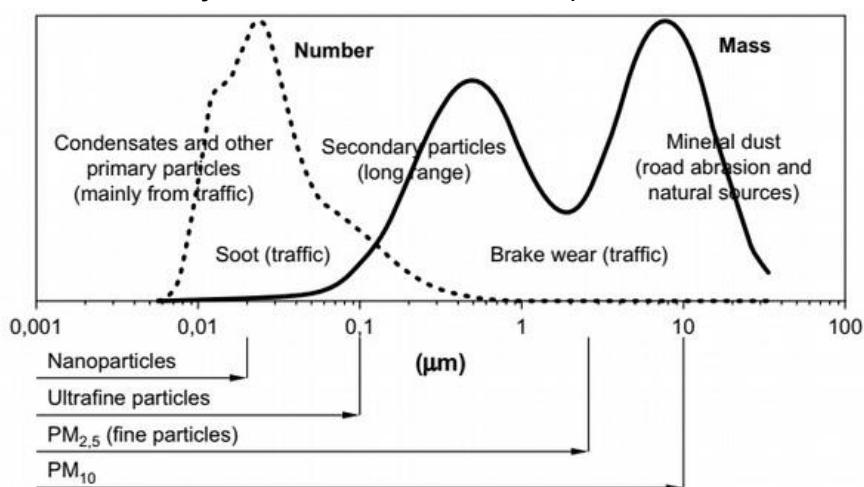
As partículas finas ainda são subdivididas em grupos. Um deles é chamado “modo de nucleação”, com diâmetro de $0,005$ a $0,1$ micrômetro, oriundas da condensação de vapores, da combustão e da reação entre gases. Possuem a tendência de se agregarem a outras partículas. Outro é denominado “modo de acumulação”, com diâmetro de $0,1$ a $2,5$ micrômetros e composição química muito diversa, composto por material capaz de residir na atmosfera por longo período, podendo ser de dias a semanas. Por isso, este tipo de material pode se depositar distante da fonte (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009).

“[...] Emitidas diretamente como partículas (aerossol primário) ou formado na atmosfera por processos de conversão gás-partícula, aerossóis atmosféricos são genericamente consideradas como partículas que variam de tamanho desde alguns nanômetros (nm) a dezenas de micrômetros (μm) em diâmetro. Uma vez no ar, as partículas podem alterar de tamanho e composição pela condensação de espécies de vapor ou pela evaporação, pela coagulação com outras partículas, por reação química ou pela ativação na presença de grande saturação de água para se transformar em gotículas de névoa ou nuvem” (SEINFELD; PANDIS, 2016, p. 79, tradução do autor).

Conforme indicado acima, além da origem e da granulometria, o material particulado apresenta variedade de composição química, fase e forma. Além disso, há a possibilidade de sofrer alterações e reações químicas durante sua dispersão na atmosfera (IEMA, 2019; SEINFELD; PANDIS, 2016).

As partículas grossas, por outro lado, são formadas por processos mecânicos (Figura 5). Por isso, possuem tempo de residência mais curto na atmosfera e podem se depositar não muito distantes da origem (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009).

Figura 5 - distribuição em massa e quantidade de partículas tipicamente urbanas, em relação ao diâmetro do material particulado.



Fonte: Fenger (2009, p.16)

Como complemento, Seinfeld e Pandis (2016) exemplificam:

“Partículas geradas por combustão, como as de automóveis, geração de energia e queima de madeira, podem ser tão pequenas quanto alguns nanômetros e tão grandes quanto 1 μm . Poeira, pólen, fragmentos de plantas e sal marinho soprados pelo vento são geralmente maiores que 1 μm . O material produzido na atmosfera por processos fotoquímicos é encontrado principalmente em partículas menores que 1 μm ” (SEINFELD; PANDIS, 2016, p. 350, tradução do autor).

Os danos causados à saúde também estão associados ao tamanho dos poluentes, de modo que, quanto menores forem, maior o potencial de causarem efeitos nocivos (NOWACKI; RANGEL, 2014). É sabido que partículas com tamanho inferior a 2,5 μm podem prejudicar significativamente os que sofrem de doenças respiratórias e cardiopulmonares, e estão relacionadas ao escapamento de veículos, sobretudo a diesel (FENGER, 2009).

As vias respiratórias são sensíveis à presença de material particulado que, quando inalado, carrega consigo outros poluentes irritantes capazes de atingir os pulmões, sendo por isso grandes causadores de doenças pulmonares, como a pneumonia (SCHIRMER, 2011). Segundo GINA (2020), existe associação significativa entre as concentrações de material particulado e a ocorrência de asma.

O Material Particulado tem um papel significativo por seus efeitos para a qualidade do ar interior (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020). Segundo Anderson (2009), partículas ultrafinas podem entrar na corrente sanguínea, o que abre a possibilidade de haver efeitos inflamatórios em outras partes do corpo. Em ambientes escolares, é fundamental o seu monitoramento para garantir a saúde dos ocupantes e permitir que tenham condições de manterem sua frequência, participação e desempenho no aprendizado.

Portanto, é importante monitorar os níveis de poluição de uma região densamente urbanizada, com alto tráfego de veículos e vizinha de um polo industrial para os níveis de material particulado e, por conseguinte, para a qualidade do ar interior nas salas de aula consideradas neste estudo.

2.3.4 Monóxido de carbono

A atmosfera terrestre é composta principalmente por Nitrogênio (N_2) a 78,03%, de Oxigênio (O_2) a 20,99% e vapor de água. Outros compostos importantes e suas concentrações típicas aproximadas são: Argônio (Ar) com 0,94 ppm, Dióxido de Carbono (CO_2) com 400 ppm, Neônio (Ne) com 18 ppm, Hélio (He) com 5 ppm, Metano (CH_4) com 1,5 ppm, Hidrogênio (H_2) com 0,5 ppm. Com menores concentrações, aparecem o Óxido Nitroso (N_2O) e Dióxido de Nitrogênio (NO_2) com 0,3 ppm cada. Em meio às substâncias deste conjunto, encontra-se o Monóxido de Carbono (CO), com 0,1 ppm (NOWACKI; RANGEL, 2014).

Segundo Seinfeld e Pandis (2016), a concentração de CO pode variar de 0,04 a 0,20 ppm, e há mais desta substância no Hemisfério Norte (0,12 ppm em média). No Hemisfério Sul, com concentração em torno de 0,06 ppm, tende a ser mais uniformemente misturado ao ar. O monóxido de carbono possui vida útil que varia de 30 a 90 dias na troposfera.

O CO possui peso molecular de 28.01 g/mol, muito similar ao do ar (aproximadamente 29) e densidade relativa de 0,967 (o ar possui $d_r = 1$). Por isso, se mistura e se transporta facilmente com a atmosfera ambiente. A entrada de monóxido de carbono é inevitável nos ambientes internos. Por isso, é importante o estudo do comportamento deste gás na atmosfera, bem como dos efeitos à saúde humana (WHO, 2010).

Na atualidade, os processos de combustão utilizados, seja para obter energia, para o cozimento, para o transporte de veículos, para a produção industrial ou outras atividades, são responsáveis por grande parte da emissão de compostos para a atmosfera (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009). Apesar de possuir fontes na natureza, pela geração de energia tem-se a emissão antrópica de monóxido de carbono, devido à ocorrência da combustão incompleta de combustíveis fósseis ou de biomassa (NOWACKI; RANGEL, 2014).

De acordo com Seinfeld e Pandis (2016), aproximadamente dois terços do monóxido de carbono é oriundo de atividades antropogênicas. Os autores ressaltam que processos tecnológicos que envolvem combustão, processos industriais e a queima de biomassa, estão entre as principais fontes. Destaca também que a oxidação de metano é a maior fonte de CO, inclusive quando essa atividade é realizada pelo homem. A OMS informa que a madeira, derivados do petróleo, carvão,

gás natural e querosene, enfim combustíveis que possuem o elemento carbono em sua composição, são geradores deste gás (WHO, 2010).

Com exceção dos óxidos de nitrogênio, a formação de gases na combustão, muitas vezes indetectáveis pelo odor e/ou difíceis de serem visualizadas, depende da composição do material combustível (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009). Dentre os gases oriundos da emissão veicular, está o monóxido de carbono.

“[...] Os gases provenientes do cano de descarga são ricos em espécies como CO₂, H₂O, CO, SO₂, NO_x e COV [...]. A quantidade emitida ainda depende do ano de fabricação do veículo, do modelo, do tipo de combustível, de como se dirige, da velocidade de condução e de regulagens do motor.” (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009, p.112)

Ou seja, o monóxido de carbono é um importante componente da fumaça veicular e é gerado principalmente em veículos mal regulados. Por isso, é comum encontrar concentrações maiores de CO em áreas urbanas, em locais em que há grande tráfego (NOWACKI; RANGEL, 2014).

Segundo informações da OMS, em áreas urbanas, baixas concentrações são possíveis em residências, igrejas e escolas, desde que não haja fontes internas e desde que esteja a uma distância maior que 500 metros de uma grande fonte de CO, como o tráfego de veículos (WHO, 2010). Isto sugere que, em áreas cada vez mais próximas de vias urbanas, as concentrações podem ser maiores.

O monóxido de carbono é um gás inodoro, insípido e invisível (IEMA, 2019; NOWACKI; RANGEL, 2014; WHO, 2010). Por isso, de acordo com Nowacki e Rangel (2014), possui a má fama de ser um “assassino silencioso”, visto que em altas concentrações é extremamente prejudicial ao organismo humano. Numa das páginas mais tristes da história da humanidade, esse gás foi uma das substâncias utilizadas pelos nazistas em câmaras de extermínio (USHMM, 2021).

O CO se combina à hemoglobina (Hb) formando a carboxiemoglobina (COHb), possuindo cerca de 240 vezes mais afinidade pela Hb do que o O₂. A hemoglobina é uma proteína dividida em quatro cadeias de aminoácidos. Ela possui átomos de ferro na forma ferrosa, capazes de se ligar a moléculas de oxigênio (O₂). Cada Hb pode se conectar a até quatro O₂, resumidamente, conforme a seguir: $Hb_4 + 4O_2 \rightarrow Hb_4(O_2)_4$ (WARD; WARD; LEACH, 2012).

Por isso, o CO pode interferir na função do sangue de transporte de oxigênio. Por essa razão, atua como um asfixiante, prejudicando a oxigenação dos tecidos nos sistemas do corpo humano (WEST, 2013; NOWACKI; RANGEL, 2014).

Quando em concentrações altas, o CO também pode ser responsável por problemas graves como o aumento do risco de doença coronariana, coma e morte (NOWACKI; RANGEL, 2014). Além disso, é possível que haja possíveis danos aos sistemas nervoso, cardiovascular e respiratório, bem como afetar o desenvolvimento de fetos e recém-nascidos (IEMA, 2019; WHO, 2010).

Pesquisas apontam que o aumento das concentrações de monóxido de carbono está estatisticamente associado ao aumento de casos de diversas doenças cardíacas (WHO, 2010).

Dependendo de como se dá o contato com esse gás, pode também causar sintomas mais leves, como mal-estar, vômito, náusea e dor de cabeça (NOWACKI; RANGEL, 2014). A exposição pode ser caracterizada como aguda quando o período de contato é singular e menor que 24h ou crônica, quando prolongada ou intermitente, por mais de 24 horas (WHO, 2010).

Conforme levantamento bibliográfico realizado pela OMS, diversos trabalhos reportaram, além os sintomas já relatados, a diminuição auditiva, dor no peito, tontura, fraqueza, falta de ar, câibras musculares, dificuldades cognitivas, mudanças de personalidade, entre outros, quando houve exposição crônica e a concentrações baixas de CO (WHO, 2010).

O mesmo documento também trata dos efeitos ao funcionamento cerebral em consequência de exposições agudas a baixos níveis de CO, com destaque para os sintomas da dor de cabeça e náusea, comumente citados nos trabalhos científicos com análises nestas condições (WHO, 2010).

Em ambientes escolares, em pesquisa divulgada pela OMS (WHO, 2010) encontrou relações entre o CO, o O₂ e o absenteísmo. Segundo os autores, a cada 1.2 mg/m³ de acréscimo na concentração de monóxido de carbono, as faltas aumentavam em 3.79%.

Além do efeito individual, a OMS informa que estudos relatam o efeito combinado com demais poluentes, como o dióxido de nitrogênio (NO₂), o dióxido de enxofre (SO₂), entre outros. Tais efeitos se referem ao aumento da ocorrência de asma, do risco de bronquiolite e de doenças cerebrais e cardiovasculares (WHO, 2010).

Conforme Seinfeld e Pandis (2016), próximo a áreas de grande tráfego, é comum encontrar maiores concentrações deste gás. Por isso, com o intuito de encontrar pesquisas que monitoraram o monóxido de carbono em ambientes escolares, fez-se uma seleção de artigos no Portal de Periódicos da CAPES9, com uso de acesso remoto ao conteúdo assinado por meio da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), com os termos “*carbon monoxide*” e “*classrooms*”. A busca foi refinada desde o ano 2015 até 2021 e resultou em 191 trabalhos. Em seguida realizou-se a leitura dos títulos e resumos a fim de selecionar os textos e os resultados são apresentados a seguir.

Uma revisão realizada a partir de dados de 14 estados norte-americanos do período de 2010 a 2013, identificou as liberações de poluentes no ar ocorridas em ambientes escolares. O monóxido de carbono ficou em terceiro lugar entre os produtos químicos mais relatados em incidentes nas escolas sem, contudo, revelar níveis de concentrações dos casos estudados (ANDERSON, 2017).

Razali *et al.* (2015) monitoraram CO, CO₂ e material particulado para investigar a influência do entorno na qualidade do ar interno em salas de aula de três escolas localizadas na Malásia. As concentrações de CO encontradas nas áreas externas, com valores variando de $0,5 \pm 0,5$ ppm a $2,3 \pm 2,0$ ppm, são devidas ao tráfego de veículos do local. Segundo autores, os valores medidos internamente foram ainda menores (médias de 0,2, 0,3 e 0,5 ppm nas três salas), e por isso classificados como excelentes, de acordo com parâmetros de qualidade da Malásia, Singapura e Hong Kong.

Estes resultados são semelhantes aos encontrados no trabalho de Ferreira e Cardoso (2013), desenvolvido nas regiões predominantemente urbanas em Coimbra, Portugal, que incluiu o monitoramento de CO na caracterização da qualidade do ar no interior de escolas tanto na estação outono/inverno como na primavera/verão. As médias encontradas foram de 0,28 ppm e 0,14 ppm, respectivamente (FERREIRA; CARDOSO, 2013).

Os valores encontrados na pesquisa de Razali *et al.* (2015) também são condizentes com um extenso trabalho de Madureira *et al.* (2015), que avaliou os níveis de diversos poluentes, entre eles o CO, em 73 salas de aula naturalmente ventiladas

9

O Portal de Periódicos da CAPES: <http://www-periodicos-capes-gov-br.ez120.periodicos.capes.gov.br/>
Acesso em: 09 nov. 2020.

de escolas localizadas no Porto, Portugal, durante o período de ocupação. A concentração média foi de 0,48 mg/m³ e 0,39 mg/m³ para os ambientes interno e externo, respectivamente. O patamar máximo chegou a 1,70 mg/m³ (aproximadamente 1,48 ppm) nos espaços interiores.

O estudo de Abdel-Salam (2019), feito em escolas do Qatar, avaliou salas de aula mecanicamente ventiladas situadas a distâncias de 30 a 750 metros das principais vias de trânsito. Os resultados indicam uma correlação significativa entre a distância das principais estradas e as concentrações de CO. A relação média entre a concentração interna/externa (I/O) foi de $0,42 \pm 0,21$. A média nos ambientes internos foi de 0,3 ppm e a máxima concentração de 1,2 ppm, ambas abaixo dos parâmetros da OMS. Neste trabalho, não foram encontradas correlações significativas entre as concentrações de monóxido de carbono e dióxido de carbono (ABDEL-SALAM, 2019).

Numa pesquisa feita em 12 escolas, na Malásia, a média concentração do monóxido de carbono foi de $2,42 \pm 0,03$ ppm. De acordo com os pesquisadores, os maiores níveis se deram nas instituições localizadas na proximidade de estradas movimentadas, principalmente em horários de maior tráfego (KAMARUDDIN; JALALUDIN; CHOO, 2015).

Toyinbo *et al.* (2019) desenvolveu um estudo na Nigéria, que avaliou a Qualidade Ambiental Interna em salas de aulas naturalmente ventiladas. Para o parâmetro monóxido de carbono, foi medida concentração ao ar livre, próximo às salas de aula (cerca de 30 metros), que alcançou a máxima de 23 ppm. Nos ambientes internos, o maior nível foi de 6 ppm. Segundo os autores, os altos valores detectados se devem ao uso de geradores a combustível próximos do local (TOYINBO *et al.*, 2019).

Os resultados de Fsadni *et al.* (2018), em Malta, identificaram associações significativas entre as altas concentrações de poluentes em ambientes internos e a problemas de inflamação nas vias aéreas. O CO alcançou média de 9,11 ppm no ambiente interno, valor que supera as diretrizes da OMS. Neste local, que possui o quinto maior número de veículos per capita do mundo, o tráfego de veículos pesados foi uma influência negativa para a qualidade do ar.

Baseado nestes resultados, pode-se inferir que a possibilidade do alcance de altas concentrações internas de monóxido de carbono está relacionada à presença de fontes externas próximas aos ambientes avaliados. Desta forma, em áreas que se localizam em região industrializada, urbanizada e próximo a via de grande tráfego, o

monitoramento do monóxido de carbono em salas de aula pode fornecer evidências da contribuição do entorno à precarização da qualidade do ar interior.

2.4 A doença do Coronavírus de 2019 e o ambiente de ensino

A pandemia da Doença do Coronavírus de 2019 (Covid-19) forçou a tomada de medidas como o fechamento de espaços coletivos como centros comerciais, serviços públicos, incluindo escolas, que permanecerem por mais de um ano, sendo que muitas utilizaram ensino remoto até o final de 2021.

A doença, causada pelo vírus SARS-CoV-2, possui taxa de letalidade estimada em 2,2% contra 9,6% do SARS-CoV e 34,4% do MERS-CoV, outros tipos de coronavírus (VELAVAN; MEYER, 2020). Apesar de, aparentemente, parecer uma porcentagem baixa, em números isso se traduz numa tragédia: no Brasil, somam-se 664.872 mortes por Covid-19 até 16 de maio de 2022 e, no mundo, 6.266.324 óbitos no mesmo período (WHO, 2022).

Com o início das campanhas de vacinação no Brasil em 2021, gradativamente os estabelecimentos de ensino retomaram as atividades presenciais. Mesmo assim, devido ao grande risco da doença, protocolos de retorno às aulas foram adotados em todos o país, dentre eles, a assepsia das mãos, o uso de máscaras, o distanciamento social e a adoção da ventilação natural nas salas de aula, por meio de portas e janelas abertas (INEP, 2022). Entretanto, ainda se tem uma lacuna de conhecimento sobre a eficácia de tais medidas em relação a disseminação do SARS-CoV-2, principalmente, no que se diz respeito, aos sistemas de ventilação e as taxas de troca de ar recomendadas nestes espaços.

Conhecer os tipos de partículas produzidas pelas atividades orais e respiratórias é importante para avaliar a situação do risco no ambiente escolar, no qual professores e alunos desempenham uma série de atividades (BIRMILI *et al.*, 2021). Pessoas infectadas eliminam o vírus SARS-CoV-2 no ar ambiente na forma de gotículas ou de partículas aerossol (BIRMILI *et al.*, 2021; XU, C. *et al.*, 2021).

2.4.1 – Dispersão de partículas contaminadas com o vírus SARS-CoV-2 em ambientes internos

Conforme Dai e Zhao (2020), mesmo que a principal via de transmissão desse vírus seja pela proximidade com pessoas contaminadas, em ambientes

internos, a contaminação via aerossóis não pode ser ignorada. De acordo com Godwin *et al.* (2021), experimentos na área de mecânica dos fluidos e de microbiologia forneceram evidências da possibilidade de transmissão do SARS-CoV-2 por meio de aerossóis. Resultados de Comber *et al.* (2020) informam que foram detectados RNA viáveis em amostras de aerossol.

O vírus SARS-CoV-2 pode ser transmitido por gotículas, que são partículas maiores, da ordem de 100 μm , e que se depositam sobre as superfícies a uma distância de até aproximadamente 1,80 m (BIRMILI *et al.*, 2021).

Meiss *et al.* (2021) detalham que, na origem da emissão, as partículas podem variar de 0,1 μm a mais de 300 μm . A respiração elimina as menores, cuja maior parte varia de aproximadamente 0,5 μm a 10 μm . Já na fala, tosse e espirro, a maior quantidade de bioaerossóis se apresenta em torno de 10 μm . Esse conjunto de informações é reiterado pelos trabalhos de Tang *et al.* (2021) e Jarvis (2020).

Quanto à composição das partículas, os vírus expelidos estão agregados a corpos que contêm outras substâncias, como água, sais, proteínas, entre outras secreções de origem respiratória (TANG *et al.*, 2021). Gotículas e aerossóis têm potencial, ainda, de se ligar a outras partículas presentes no ar, de forma que os poluentes também podem ser portadores do vírus causador da Covid-19 (SHAMSI *et al.*, 2021).

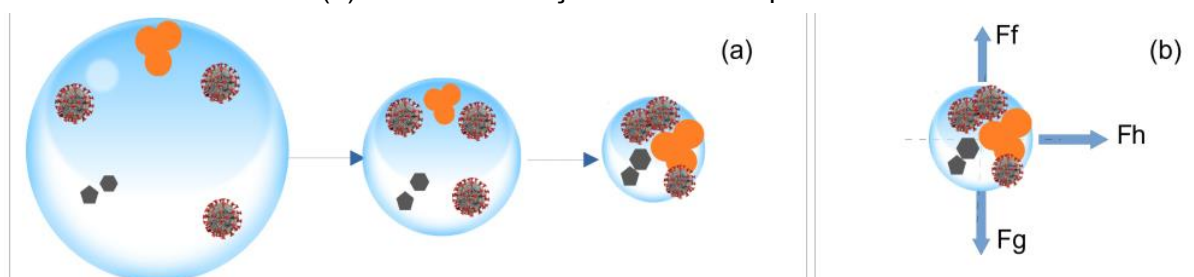
Quando, ao falar, tossir ou respirar, as pessoas eliminam aerossóis menores que 5 μm , estes podem permanecer em suspensão no ar de 30 minutos até por várias horas (ALLEN; IBRAHIM, 2021; CHEN *et al.*, 2021). Por esta razão, mesmo que a pessoa infectada não esteja mais na sala de aula, permanece o risco de infecção pelo longo tempo em suspensão no ambiente em caso de renovação de ar insuficiente (BIRMILI *et al.*, 2021). O tamanho das partículas possui, portanto, grande influência em sua dispersão e permanência no ambiente interno (XU *et al.*, 2021).

De acordo com trabalhos, a emissão, por si só, ocorre sob dimensões de partículas variadas. Além disso, após a eliminação das gotículas e aerossóis, se dá um processo de evaporação, que ocasiona a redução gradativa das partículas. Esse processo é influenciado pela temperatura e pela umidade do ambiente interno (MORAWSKA; CAO, 2022; TANG *et al.*, 2021; MEISS *et al.*, 2021). Gotículas com cerca de 100 μm , demoram cerca de 1 minuto para evaporarem, enquanto os aerossóis, por serem menores, segundos ou até menos (JARVIS, 2020). Na literatura médica, a partícula que se evapora, sofre redução de diâmetro e permanece em

suspensão é denominada núcleo de gotícula (JARVIS, 2020; DELIKHOON *et al.*, 2021).

As partículas sofrem a ação de um sistema de forças (Figura 6): a gravidade, a de arraste (horizontal) e a de flutuação (para cima), que prevalece nas de menor tamanho, o que contribui para que continuem em suspensão (MEISS *et al.*, 2021), além da turbulência, velocidade e direção do ar no ambiente interno (TANG *et al.*, 2021).

Figura 6 – (a) Evaporação de partícula contaminada com vírus
(b) Sistema de forças atuantes na partícula.

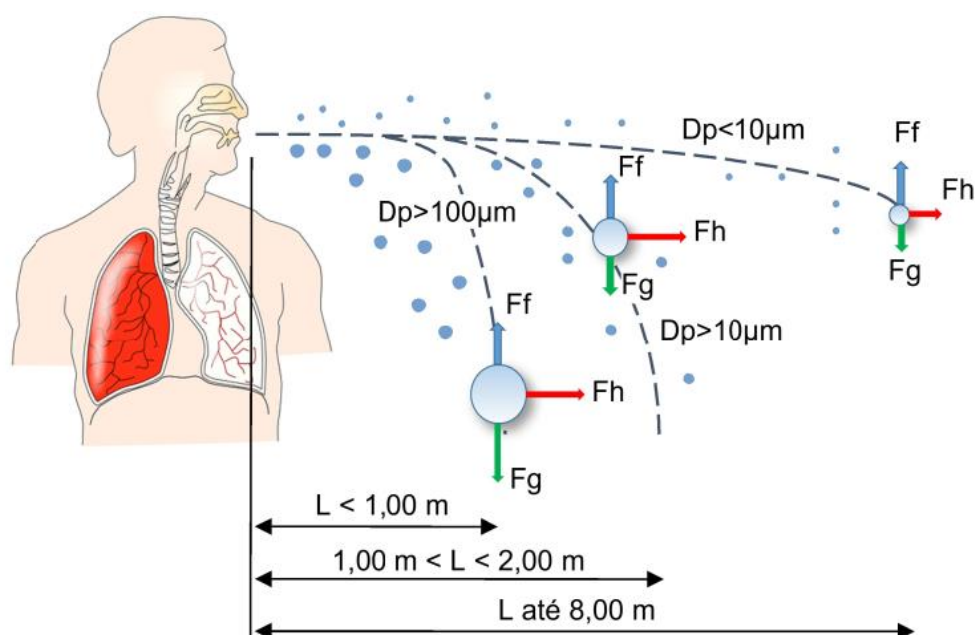


Fonte: o autor (2022)

Godwin *et al.* (2021) pontuam que as atividades desempenhadas pelas pessoas e reações fisiológicas são capazes de emitir, gradativamente, mais gotículas no ar, segundo a ordem crescente a seguir: 1) respirar; 2) respirar intensamente; 3) falar; 4) cantar; 5) tossir e 6) espirrar, sendo que a diferença de emissão entre esses tipos de atividade é bastante significativa. A distância percorrida pelas partículas pode variar de 1,00 m (fala), 2,00 m (tosse) a 8,00 m (espirro). Por isso, recomendam o distanciamento mínimo de 2,00 m.

Devido tanto à emissão em variados tamanhos quanto ao processo de evaporação, tem-se desde gotículas com maior diâmetro aerodinâmico, que se depositam mais próximo da origem, até aerossóis com dimensão submicrônica, que permanecem em suspensão por mais tempo e alcançam até oito metros (Figura 7).

Figura 7 - Emissão e dispersão de partículas e sistema de forças



Fonte: o autor, com base em Morawska e Gao (2022); Meiss et al. (2021), Delikhon et al. (2021) e XU, C. et al. (2021)

Há ainda, na literatura, uma divergência de informações quanto às dimensões e ao alcance das partículas. Delikhon *et al.* (2021) concluem que os aerossóis em suspensão, que atingem metros de distância, são aqueles menores que 5 micrômetros, e não 10. Já as informações divulgadas por Tang *et al.*, (2021) se referem a partículas de 5 a 10 μm como capazes de se depositarem a grandes distâncias. E, ainda, os resultados de Azuma *et al.* (2020) apresentam uma variação de 1,6 μm a mais de 120 μm . A este respeito, Xu *et al.* (2021) explicam que a existência de uma grande variação de grandeza das partículas é devida tanto aos diferentes mecanismos de formação fisiológica quanto às diversas técnicas utilizadas para sua medição.

2.4.2 Ventilação em salas de aula como medida auxiliar para redução do risco de contaminação

Em locais públicos, onde é possível a ocupação com maior densidade, o risco de infecção é maior devido à possível emissão e acúmulo de gotículas e de partículas aerossóis contaminadas no ar interno, como é o caso de ambientes escolares (MORAWSKA; CAO, 2022).

Abajo *et al.* (2020) exemplificaram que medidas para redução do risco de contaminação pelo vírus SARS-CoV-2 podem ser aplicadas conforme três linhas básicas de ação: a primeira, pela adoção de protocolos e medidas gerais mitigadoras

adotadas pelas pessoas, o que depende da ação social e política; a segunda, pela alteração da estrutura física dos espaços ocupados, o que requer planejamento e prazo; e a terceira, pela inativação do vírus. Nesse contexto, as partículas contaminadas podem ser removidas da atmosfera do ambiente tanto pela eliminação do ar contaminado por meio da exaustão, quanto pela inativação viral (chamada decadência viral) e pela sedimentação gravitacional (PAVILONIS *et al.*, 2021).

De fato, já é possível conhecer resultados das estratégias de prevenção do Covid-19 em ambientes educacionais. No contexto de retorno às aulas em meio à pandemia, uma pesquisa robusta feita em 169 escolas localizadas na Geórgia, Estados Unidos, por Gettings *et al.* (2021), constatou que apenas 65,1% dos estabelecimentos exigiam a utilização de máscaras faciais pelos professores e funcionários, enquanto somente 51,5% solicitaram o uso entre os estudantes. No que diz respeito à ventilação, este trabalho concluiu que a incidência de Covid-19 foi 48% menor em escolas que adotaram métodos de filtração e diluição do ar de maneira simultânea, contra apenas 35% menor nas que empregaram apenas métodos de diluição.

Diversos autores defendem a adoção de múltiplas estratégias para redução de risco de contaminação dos usuários com o vírus SARS-CoV-2. Destaca-se a indicação de melhoria da ventilação e da renovação de ar, em ambientes internos, como medida complementar, ou seja, como parte de um conjunto de ações de enfrentamento da pandemia de Covid-19 (ASANATI; VODEN; MAJEED, 2021; VASSELA *et al.*, 2021; XU, Y. *et al.*, 2021; GETTINGS *et al.*, 2021; DAI; ZHAO, 2020; ALLEN; IBRAHIM, 2021; GODWIN *et al.*, 2021; VOLPP *et al.*, 2021; KAPOOR *et al.*, 2021; MEISS *et al.*, 2021; ZIVELONGHI; LAI, 2021; DAWSON *et al.*, 2021; LAM-HINE *et al.*, 2021; CHEN, Q. 2021, HONEIN *et al.*, 2020; entre outros).

Asanati, Voden e Majeed (2021) argumentam que a ênfase dada à melhoria da qualidade do ar deve ser a mesma despendida ao uso de máscaras e ao distanciamento pessoal. Conforme Godwin *et al.* (2021), em conjunto com as demais medidas de prevenção, a ventilação pode concorrer para a redução do risco de transmissão da doença em virtude da diluição e dispersão, pelo ar, das partículas contaminadas, medidas reforçadas por Xu *et al.* (2021).

Meiss *et al.* (2021) após a combinação de diferentes estratégias de aberturas da edificação, concluíram que a utilização em conjunto da ventilação natural, sistemas de ar-condicionado e dispositivo com filtros HEPA foi a configuração

que permitiu remover mais partículas em menor tempo. Por outro lado, muitos autores indicam minimamente a opção do uso de portas e janelas abertas como caminho em locais onde existem impedimentos para a instalação de sistemas de filtragem e renovação de ar por sistemas mecânicos, no curto prazo (ASANATI; VODEN; MAJEED, 2021).

Nesse sentido, num contexto de prevenção da contaminação com Covid-19 em salas de aula, muitos trabalhos, em diferentes países, utilizaram medições de concentrações de dióxido de carbono como indicador da renovação de ar do ambiente. Pode-se citar: na Espanha (MONGE-BARRIO *et al.*, 2022; MELGAR *et al.*, 2021; ALONSO *et al.*, 2021; VILLANUEVA *et al.*, 2021); na Suíça (VASSELA *et al.*, 2021); no Reino Unido (VOURIOT *et al.*, 2021); na Eslovênia (LOVEC; PREMROV; LESKOVAR, 2021); na Itália (DI GILIO *et al.*, 2021), entre outros. Enquanto isso, outras pesquisas também adotaram as concentrações de CO₂ como indicador da qualidade do ar, porém em estudos de simulação, como: Stabile *et al.* (2021) e Cammarata e Cammarata (2021).

Na Espanha, cujo protocolo de segurança contra Covid-19 define o limite de 800 ppm para concentração de CO₂, um estudo avaliou a eficácia da ventilação com base nos níveis de gás carbônico. Compararam-se dois cenários: antes e após a aplicação de protocolo de ventilação natural em resposta à pandemia. Constatou-se que as concentrações do período anterior alcançaram patamares acima de 2000 ppm enquanto, no segundo momento, foi inferior a 700 ppm. Por isso, concluiu-se que as ações foram eficientes para melhorar a qualidade do ar, porém com a desvantagem de reduzir o desempenho térmico do edifício (MELGAR *et al.*, 2021).

Em ambientes internos, a concentração de CO₂ também é indicadora da geração e do espalhamento do ar respirado e, potencialmente, da concentração de partículas contaminadas com vírus quando há um ou mais usuários infectados (DUILL *et al.*, 2021), o que torna seu acompanhamento mais relevante no contexto de pandemia e pós-pandemia de Covid-19 ou possíveis futuras emergências de saúde.

2.5 Legislação e Normas referentes à Qualidade do Ar de Interiores

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados quanto à toxicidade e frequência de ocorrência em: poluentes padrão, sendo os que possuem grande ocorrência e são danosos tanto à saúde quanto ao bem-estar das pessoas; os poluentes perigosos se referem àqueles com potencial de causar grande mortalidade,

doenças graves ou incapacitantes. Há ainda os poluentes incômodos pelos odores que apresentam às pessoas (NOWACKI; RANGEL, 2014).

Os mais perigosos, como benzeno, asbesto, mercúrio, arsênio e cloreto de vinila, por exemplo, são regidos por padrões de emissão. Já os poluentes como monóxido de carbono, material particulado, dióxido de enxofre (SO₂) e ozônio (O₃), são controlados por padrões de qualidade do ar, que definem os limites máximos de concentração dessas substâncias (NOWACKI; RANGEL, 2014).

Os padrões de qualidade do ar auxiliam como instrumentos de gestão ao definir valores de concentração de poluentes específicos (IEMA, 2019). Não possuem caráter definitivo e precisam ser revisados periodicamente (NOWACKI; RANGEL, 2014).

A Organização Mundial de Saúde (OMS) – em inglês, *World Health Organization (WHO)*, é um organismo internacional integrante da Organização das Nações Unidas (ONU). Promove a pesquisa científica relacionada à saúde a nível mundial. Além disso, trabalha no sentido de auxiliar no estabelecimento de diretrizes e normas (IEMA, 2019).

Segundo Anderson (2009), inicialmente, a OMS definiu diretrizes e parâmetros de qualidade do ar com base no limiar de segurança. Em seguida, determinou valores voltados para a saúde, cujos limites foram significativamente reduzidos após algumas décadas. Essas reduções foram baseadas em evidências científicas de que não havia um limiar exato para que houvesse efeitos danosos à saúde.

Todavia, enquanto padrões regulatórios (leis) são de aplicação compulsória, diretrizes (normas) são recomendações (HESS-KOSA, 2019), que não são necessariamente obrigatórias até que sejam impostas por algum instrumento legal. Regras de organismos internacionais possuem um caráter semelhante, pois se tornam base para leis ou padrões regulamentadores locais. A respeito das diretrizes da OMS, exemplifica o IEMA (2019):

“As diretrizes da OMS para qualidade do ar não têm caráter regulatório, para que aconteça estas devem ser recepcionadas no aparato legal dos locais onde se pretende utilizá-las na forma de padrões de qualidade do ar, por exemplo (IEMA, 2019, pág. 17)”.

A primeira publicação de diretrizes, pela OMS, é datada de 1987, seguida de algumas atualizações, sendo que, entre as mais recentes, estão as de 2005 e de

2010. Em 2021, como resultado de um entendimento de que a poluição do ar representa ainda uma grande ameaça à saúde, baseada em extensas pesquisas, a OMS publicou sua atualização para as novas Diretrizes da Qualidade do Ar (Tabela 2), que foram adotadas como referências para o presente estudo.

Tabela 2 - Níveis recomendados conforme Diretrizes da Qualidade do Ar de 2021

Poluente	Período considerado	Concentração limite
CO	24 horas (média)	4 mg/m ³ (aprox. = 3,49 ppm)
MP _{2,5}	1 ano (média)	5 µg/m ³
	24 horas (média)	15 µg/m ³
MP ₁₀	1 ano (média)	15 µg/m ³
	24 horas (média)	45 µg/m ³

Observação: este quadro não apresenta as metas intermediárias.

Fonte: WHO (2021)

Apesar das normativas a nível global, diversos países organizam padrões de qualidade e limites de concentração de acordo com suas particularidades. Entretanto, em nações onde isso não ocorre, “parâmetros são desenvolvidos, revistos e atualizados por comitês de profissionais *experts*” (HESS-KOSA, 2019, p.09). É o que acontece, nos Estados Unidos, com os documentos emitidos pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*¹⁰ (ASHRAE) e outras recomendações, como as Canadenses e Europeias (HESS-KOSA, 2019).

Os parâmetros da ASHRAE são referências difundidas no mundo todo quando se trata de investigação da qualidade do ar interior (HESS-KOSA, 2019). Para esta instituição, a ventilação mínima necessária em uma sala de aula é de 18 m³/h/p (metros cúbicos por hora por pessoa) (TRAN et. al, 2017).

Para salas de aula do Reino Unido, a concentração média de CO₂ não pode ser maior que 1500 ppm durante o período ocupado e a máxima não pode ser superior 2000 ppm. Para a taxa de ventilação, o valor mínimo é de 3 l/s/p (litros por segundo por pessoa) e o médio deve ser acima de 5 l/s/p (CHATZIDIAKOU; MUMOVIC; SUMMERFIELD, 2015).

10 Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado

Na Dinamarca, a regulamentação construtiva determina que a taxa de ventilação mínima seja de 5 l/s/p mais 0,35 l/s/m² de área de piso, bem como os níveis de CO₂ não podem ultrapassar 1000 ppm (GAO; WARGOCKI; WANG, 2014).

O Quadro 1 resume requisitos de alguns países e órgãos para qualidade do ar em ambientes internos não residenciais e, em alguns casos, específicos para salas de aula.

Quadro 1 - Requisitos normativos e legais para a QAI em ambientes não residenciais e/ou salas de aula, considerando a concentração de CO₂ e/ou trocas de ar por hora

PAÍS / TERRITÓRIO / CONTINENTE	CONCENTRAÇÃO DE CO ₂ (ppm)	ACH (h ⁻¹)	REFERÊNCIA
Dinamarca	1000	–	(GAO; WARGOCKI; WANG, 2014)
Portugal	1250	4.0	(ALMEIDA et al., 2017)
Reino Unido	1500 (média) 2000 (máxima)	3.0	(CHATZIDIAKOU; MUMOVIC; SUMMERFIELD, 2015) (ALMEIDA et al., 2017) (MUMOVIC et al., 2009)
Alemanha	1500	3.3	(ALMEIDA et al., 2017)
Finlândia	1200	3.6	(ALMEIDA et al., 2017)
Europa EN 13779 ^c	≤400 (alta qualidade - IDA1) 400-600 (média – IDA2) 600-1000 (moderada - IDA3) ≥1000 (baixa - IDA4)	–	(MAINKA; ZAJUSZ-ZUBEK, 2015)
França	–	2.5 a 3.0	(ALMEIDA et al., 2017)
Hong Kong	< 800 <1000 ^b	–	(SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020)
China	1000	–	(MA; ZHAN; XU, 2019)
Estados Unidos (ASHRAE 62.1 – 2016)	1080 ^a	3.7	(ALMEIDA et al., 2017) (MA; ZHAN; XU, 2019) (ASIF; ZEESHAN; JAHANZAIB, 2018)
Europa (EN 15251 2007)	880 ^c	5.0	(ALMEIDA et al., 2017)
Brasil ^d	1000	–	(ANVISA, 2003)

Observações:

- 700 ppm acima da concentração de ar externo, considerada 380 ppm.
- Segundo o autor, são classificações do ar como “excelente” (800 ppm) e “bom” (1000 ppm).
- Classificado de acordo com a diferença de concentração de CO₂ entre interior e exterior.
- Pela Resolução RE 09, são 1000 ppm para ambientes internos com ar-condicionado.

Fonte: o autor (2022)

Mesmo que países estabeleçam seus critérios para qualidade do ar, o organismo que lidera e é referência para todo o mundo é a Organização Mundial de

Saúde. A OMS define diretrizes para os limites de concentrações dos principais poluentes do ar seja para o ambiente externo, seja para o interno (WHO, 2020).

Outro organismo de prestígio é a EPA, (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), fundada em 1969 (KEELER; VAIDYA, 2018). Esta agência foi responsável pela publicação da *National Ambient Air Quality Standards*¹¹ (NAAQS), que podem ser aplicáveis à QAI em cidades (americanas) que não atendem aos padrões de qualidade do ar externo em um ou mais parâmetros (HESS-KOSA, 2019; NOWACKI; RANGEL, 2014). A norma da ASHRAE cita alguns limites que constam no NAAQS (Ver Quadro 2).

Quadro 2 – Referências da NAAQS e ANSI/ASHRAE 62.1-2019 para qualidade do ar

Poluente	Concentração Limite	Período Limite	Observação
Monóxido de Carbono (CO) ¹²	35 ppm	1 hora	Não exceder mais que uma vez ao ano
	9 ppm	8 horas	
Material Particulado Ø < 2,5µm (MP2,5) ¹³	35 µg/m³	Prim./Secund.	Percentil 98, média de 3 anos
	12 µg/m³	Primária	Média anual, calculada sobre 03 anos
	15 µg/m³	Secundária	

Primária: diz respeito à proteção à saúde das pessoas, inclusive aquelas com maior sensibilidade.
Secundária: diz respeito à proteção ao bem-estar e aos danos à visibilidade, aos animais, à vegetação e construções.

Fonte: EPA, 2021; ANSI-ASHRAE, 2019.

No Brasil, a Lei nº 6.437, de 20 de agosto de 1977, configura infrações à legislação sanitária federal, bem como estabelece as penalidades. O artigo 10º lista as transgressões, conforme abaixo:

“Art. 10 – São infrações sanitárias:

XXIV – inobservância das exigências sanitárias relativas a imóveis, pelos seus proprietários, ou por quem detenha legalmente a sua posse:

pena – advertência, interdição, e/ou multa;

[...]

11 Padrões Nacionais de Qualidade do Ar Ambiente (externo).

12 Valores em ppm: 7mg/m³ = 6,11 ppm; 10mg/m³ = 8,73 ppm; 35mg/m³ = 30,55 ppm; 100mg/m³ = 87,29 ppm

13 Diretrizes da OMS para poluição do ar em geral.

XXIX – transgredir outras normas legais e regulamentares destinadas à proteção da saúde”.

A Resolução nº 09, de 20 de janeiro de 2003, foi publicada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. Neste ato, revisou e atualizou o documento anterior (Resolução RE/ANVISA nº 176 / 2000), estabelecendo padrões de referência e orientações para o controle da qualidade do ar interior de ambientes públicos e coletivos (§3º; art. 1º). Apesar de ser direcionada a ambientes climatizados, pela falta de normativas específicas para espaços com ventilação natural, neste trabalho será adotada como referência nacional para a concentração de dióxido de carbono, que é limitado a 1000 ppm e considerado um indicador de renovação do ar.

Mesmo sem aparentemente haver sinais de problemas, o edifício com má qualidade do ar é capaz de levar a sintomas adversos a saúde devido à exposição, mesmo que a baixas concentrações, a uma variedade de compostos químicos (GODISH, 2000). Por isso, o monitoramento de concentrações com base em normativas é útil para o controle da qualidade.

3 METODOLOGIA

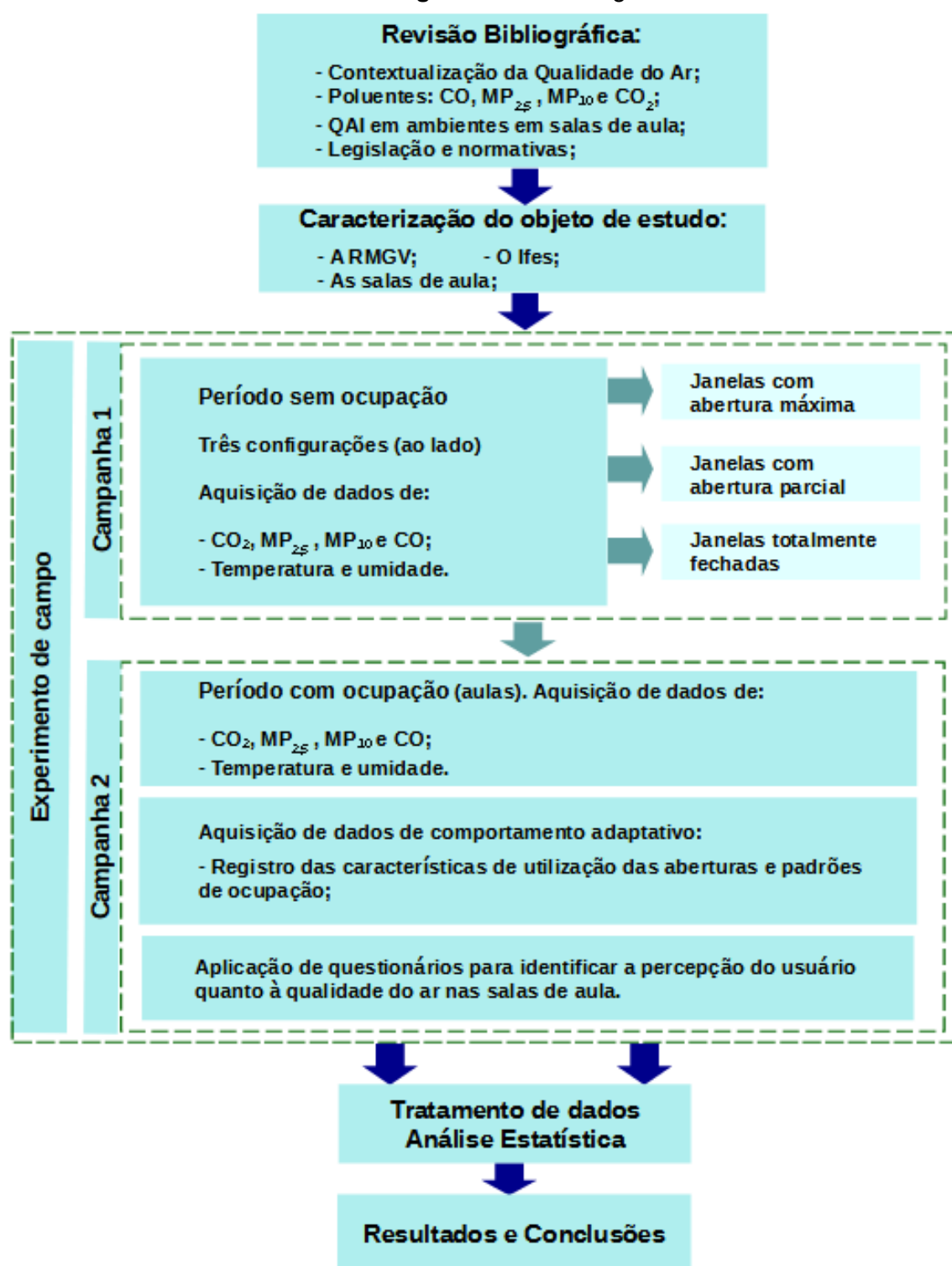
Nesse capítulo são apresentadas as características do local, bem como os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa. As subseções incluem a descrição do método, da região e do município. Apresentam ainda a instituição de ensino e seus ambientes selecionados. Além disso, indica os instrumentos de medição, formulários de registro e questionários utilizados no levantamento de campo, como também informações acerca da análise de dados.

3.1 Descrição do método

A metodologia adotada compreende um levantamento bibliográfico, seguido da pesquisa quantitativa, com levantamento de dados referentes aos parâmetros e poluentes do ar. Em seguida, fez-se o tratamento de dados, que consistiu na organização e identificação para, em seguida, realizar-se o tratamento estatístico. Esse trabalho também se caracteriza por ser uma pesquisa explicativa, com vista a identificar os fatores relacionados à qualidade do ar interior (GIL, 2018).

A partir dos dados, procedeu-se a comparação com algumas das principais leis e normas nacionais e internacionais, a fim de se avaliar a conformidade com os parâmetros de qualidade do ar e, com uso de métodos estatísticos, as relações entre variáveis, como também entre dados e respostas dos participantes dos questionários. Conforme Figura 8, os passos principais adotados neste trabalho foram:

Figura 8 - Metodologia

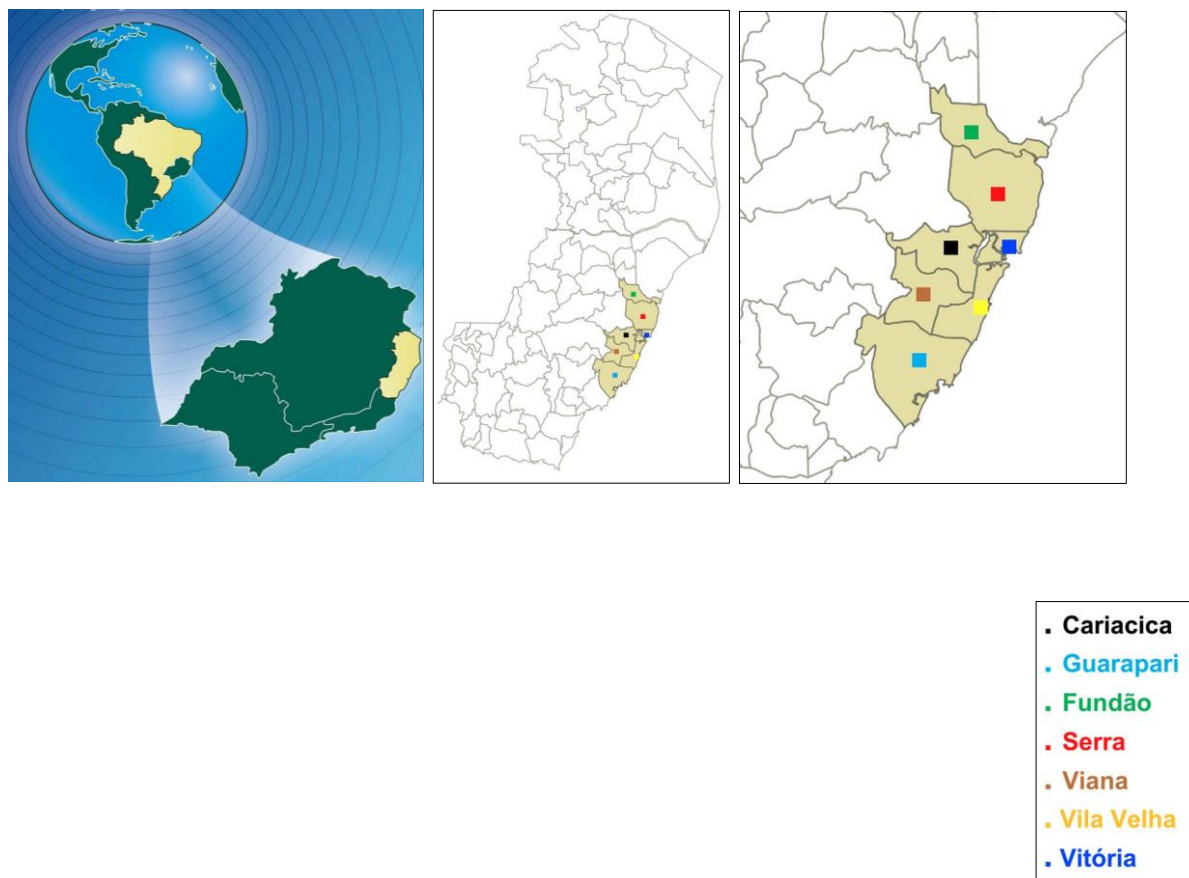


Fonte: o autor (2022)

3.2 A Região Metropolitana da Grande Vitória

A Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), localizada no estado do Espírito Santo, compõe os arredores do objeto de estudo. Seu posicionamento geográfico pode ser visualizado nas Figura 9.

Figura 9 - Localização do Estado do Espírito Santo (a) e Região Metropolitana da Grande Vitória e seus municípios (b)



Fonte: (a) adaptado de Instituto Jones dos Santos Neves (2020)¹⁴
(b) adaptado de IJSN (2005)

A RMGV é composta pelos municípios de Cariacica, Fundão, Guarapari, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória. Em 2011, sua área total era de 2.316,49km², sendo 672,57 km² de área urbana (JABOUR DE FRANÇA; BERGAMASCHI, 2011). Dados atuais apontam uma superfície de 2.331 km² e população de 1,95 milhão de pessoas (IBGE, 2018).

A formação da RMGV é resultado de um adensamento urbano/populacional influenciado por um forte desenvolvimento industrial nas décadas de 70 e 80 do século XX, principalmente na área de bens intermediários, como aço, celulose, e minério de

14 Disponível em: <http://www.ijsn.es.gov.br/mapas/>. Acesso em: 01 nov. 2020.

ferro. Foi criada pelo Estado com a promulgação da Lei Complementar (LC) nº 58/1995, e os municípios de Guarapari e Fundão foram incluídos, respectivamente, em 1999, com a LC nº 159, e em 2001, com a LC nº 204 (IJSN, 2005).

O clima desta região está classificado como tropical quente. Possui verão chuvoso e quente, porém essas características se estendem de outubro a abril, apesar de mais intensas em dezembro e janeiro. Com um inverno ameno e seco, o mês de julho se apresenta como o de menor temperatura, com média de temperaturas mínimas de 19,5 °C. O regime de vento se caracteriza por ser bastante variável com brisas de vale e montanha, brisas marinhas e terrestres, mesmo que seja predominantemente oriundo do Nordeste (NE) com velocidade média de 1,93 m/s registrados na estação meteorológica da Enseada do Suá (IEMA, 2019).

No ar externo, as variáveis meteorológicas influenciam diretamente a dispersão dos poluentes. Dentre elas, estão: regime de ventos, temperatura ambiente, umidade, precipitação pluviométrica, etc. Sabe-se que a baixa umidade pode contribuir para a piora nos níveis de poluição e, como consequência, o agravamento dos problemas de saúde (IEMA, 2019).

A RMGV possui grande número de indústrias, cujas emissões de poluentes afetam a qualidade do ar. É também rica em tráfego de veículos automotores, possui complexos portuários, aeroporto, entre outros fatores que se caracterizam como fontes de poluição (IEMA, 2019).

Por este motivo, se apresenta uma região com peculiar risco à saúde os habitantes. Segundo Ward, Ward e Leach (2012):

"A poluição atmosférica na forma de emissões de veículos motorizados, particulados de diesel e fumaça, particularmente pelas principais rodovias e nas cidades, exacerba os sintomas de doença respiratória e pode levar a um aumento da mortalidade em indivíduos vulneráveis e idosos" (WARD; WARD; LEACH, 2012, p.75).

Dados da evolução da frota da Região Metropolitana da Grande Vitória apontam a existência de 954.474 de veículos. Os municípios de Vitória, Serra e Vila Velha são os três primeiros colocados em quantidade, com 202.845, 221.809 e 238.290 unidades, respectivamente (IBGE, 2020).

A capital do Estado do Espírito Santo, Vitória, foi recentemente elevada na hierarquia das cidades brasileiras (A GAZETA, 2020). É uma das 12 cidades identificadas como metrópole, com aproximadamente 1,8 milhão de pessoas residindo

no núcleo de seu arranjo populacional, que consiste num recorte territorial formado por agrupamentos de dois ou mais municípios. Vitória também possui conexões externas com outras importantes metrópoles como: Belo Horizonte, Brasília, Rio de Janeiro, Salvador e São Paulo (IBGE, 2020).

O município de Vitória está localizado fuso horário UTC -3, na Latitude 20°19'15" e Longitude 40°20'10" (PMV, 2014) com uma população estimada de 365.855 pessoas (IBGE, 2020). No Estado do Espírito Santo, figura entre os maiores quanto à taxa de urbanização, que é a relação entre a população urbana e a população total do município (JABOUR DE FRANÇA; BERGAMASCHI, 2011).

Áreas urbanizadas são as partes da cidade que apresentam edificações de maneira contínua. Vitória possui 56,06% de sua área disponível urbanizada, sendo por isso o mais proporcionalmente urbanizado do Estado. Seus espaços remanescentes (não ocupados) são compostos por áreas de reserva ecológica, por massa d'água e pelo maciço central junto ao Parque da Fonte Grande (JABOUR DE FRANÇA; BERGAMASCHI, 2011). Ou seja, nesse município, a proporção entre áreas urbanas e não urbanizadas é maior do que nos demais municípios do Espírito Santo (ver Figura 11) (MAGALHÃES; TOSCANO; BERGAMASCHI, 2012).

O município foi fundado em 1551. Porém, foi a partir do início do século XX que ocorreram as principais obras de expansão. Nas quatro primeiras décadas, houve aterro de mangue na atual região do Parque Moscoso, melhorias do Porto de Vitória, ampliação de vias, serviços de água, drenagem, implantação de bonde elétrico, construção da ponte Florentino Avidos, entre outras (PMV, 2016). Neste período, surgiram os bairros de Jucutuquara, Praia do Suá e Praia do Canto. É desta época o projeto do Novo Arrabalde, de autoria de Saturnino de Brito, que focou no planejamento da expansão urbana a leste e o Plano Geral da cidade de Vitória, de 1917, por Henrique de Novaes, que objetivou a reestruturação da área urbanizada central existente (MENDONÇA, 2010).

Na década de 50, novos aterros foram realizados e, na de 60, a ocupação da parte continental da cidade, como a Região de Camburi. Surgiram novos bairros, por exemplo: Barro Vermelho, Santa Lúcia, Goiabeiras, Bairro de Fátima, Jardim da Penha, entre outros. Também ocorreu a instalação da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), do aeroporto e do porto de Tubarão. Nos anos 70 e 80, cresceram os bairros Joana D'arc, Tabuazeiro, Fradinhos e surgiram muitos outros,

como: São Pedro I, Maria Ortiz, etc. Deste período é a implantação do porto de Praia Mole (PMV, 2016).

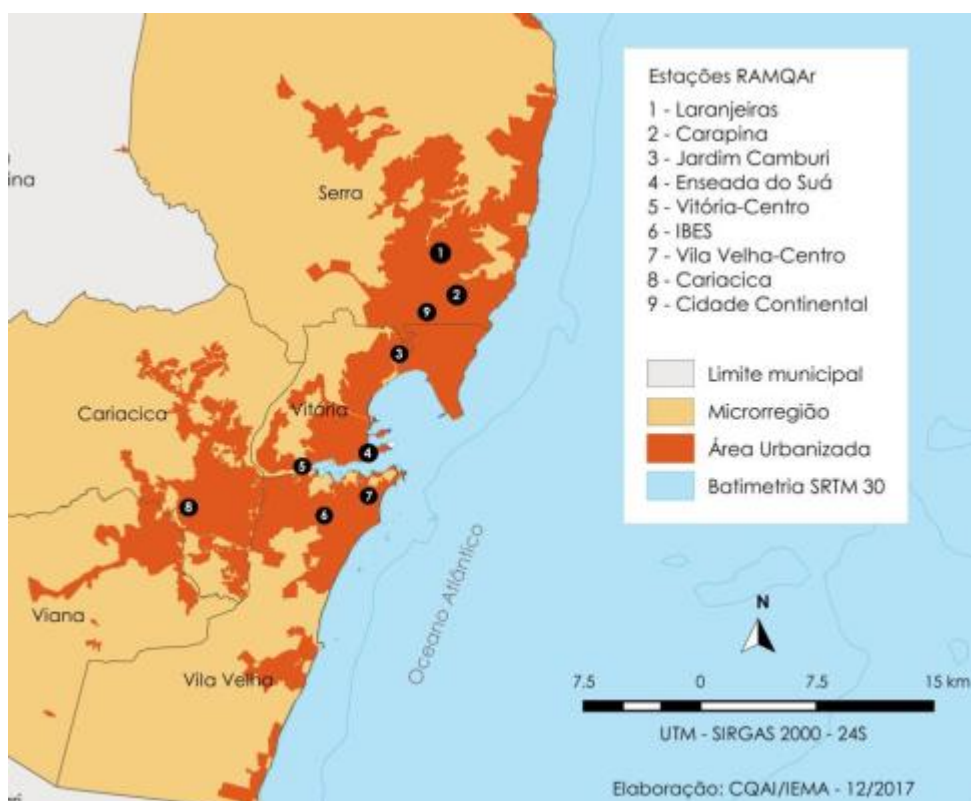
Combinado ao posterior desenvolvimento industrial (décadas de 70, 80 e 90), pode-se perceber que o crescimento da cidade foi tardio e se caracterizou por grandes mudanças em pouco mais de um século. A implantação da Siderúrgica de Tubarão, em 1976, acompanhado das demais atividades portuárias e industriais, causaram o agravamento dos problemas de poluição do ar. Soma-se a isso o aumento do adensamento urbano com a ocupação de lotes e verticalização das edificações, bem como o crescimento de novos centros de comércio dos anos 2000 a 2010 (PMV, 2016).

O município de Vitória está próximo a uma grande região industrial, com foco na mineração e siderurgia, com impactos na qualidade do ar do município, segundo o Relatório da Qualidade do AR (IEMA, 2019).

3.3 Monitoramento da Qualidade do Ar na RMGV

O Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) opera um sistema de monitoramento da qualidade do ar subdividido em dois conjuntos com finalidades distintas: o primeiro é a rede automática de monitoramento da qualidade do Ar (RAMQAr) e a segunda é a rede manual de monitoramento de poeira sedimentável (RMPS), conforme Figura 10 (IEMA, 2019).

Figura 10 – Mapa com a distribuição das estações RAMQAr e proporção de área urbanizada em cinco dos municípios da RMGV



Fonte: IEMA (2019)

As estações de monitoramento estão localizadas em quatro municípios distintos da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV). Três delas situam-se em Vitória: RAMQAr 3, na Unidade de Saúde do bairro Jardim Camburi; RAMQAr 4, no Corpo de Bombeiros, bairro Enseada do Suá e RAMQAr 5, no Ministério da Fazenda, Centro (IEMA, 2019).

Cada local contém equipamentos de propriedade e responsabilidade do IEMA, e estão instalados com objetivo de verificar: o atendimento aos padrões de qualidade do ar externo, a efetividade das medidas de controle, a influência das atividades antrópicas e ainda de fazer a vigilância nas proximidades de fontes específicas. Indiretamente, o monitoramento proporciona a avaliação das tendências urbanas no que diz respeito à poluição do ar, bem como do inventário de emissões. Proporciona também a avaliação de modelos de dispersão, que podem servir de base para estudos de risco e pesquisas acadêmicas (IEMA, 2019).

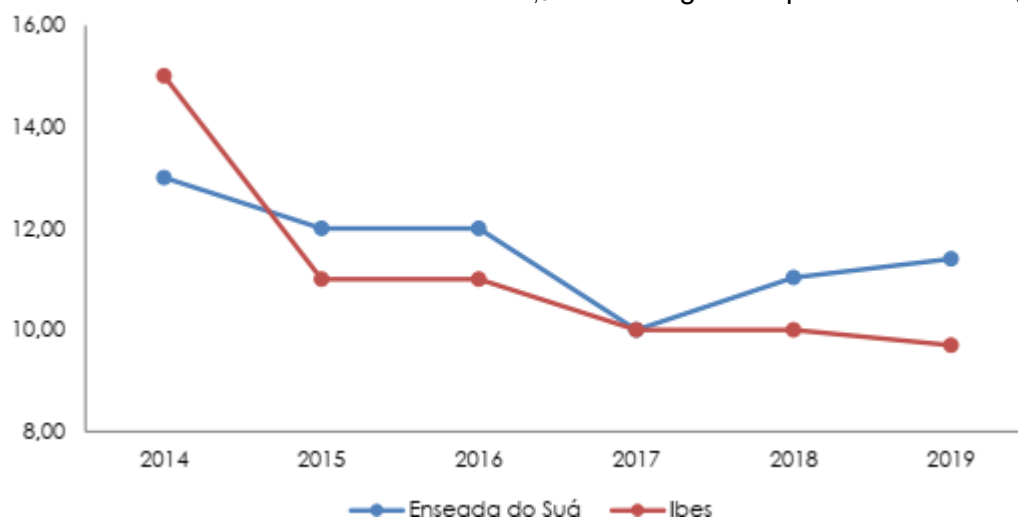
Todas as estações automáticas transformam as informações coletadas em tempo real em médias horárias, que caracterizam os dados brutos da qualidade do ar externo urbano. A título de comparação com padrões e regulamentos (como a OMS), são calculadas médias aritméticas anuais para MP_{10} e $MP_{2,5}$ (entre outros poluentes),

médias móveis de 24 horas para MP_{10} e $MP_{2,5}$. Para CO (entre outros), são calculadas médias móveis de 8 horas e médias horárias (IEMA, 2019).

As médias móveis de 24 horas dizem respeito ao momento verificado e à média referente às últimas vinte e quatro horas consecutivas anteriores. Por exemplo: ao meio-dia, tem-se uma média avaliada até as 12 horas do dia anterior. Às 13h, outra média é calculada até 13h do dia anterior, e assim por diante. Desta forma, para cada dia de monitoramento, este cálculo é realizado 24 vezes (IEMA, 2019).

Nas estações de monitoramento RAMQAr 4 e RAMQAr 6, Enseada do Suá e Ibes respectivamente, apresentaram máximas médias de 24h para as concentrações de $MP_{2,5}$ que ultrapassaram o valor de referência de $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ da Organização Mundial de Saúde¹⁵, num total de 35 ocorrências em 2019. Em relação às médias anuais, a estação da Enseada do Suá também apresentou quantitativo superior, no total de $11,4\mu\text{g}/\text{m}^3$ contra $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ da OMS (IEMA, 2019). As Figuras 11 e 12 apresentam as séries históricas contendo as médias aritméticas anuais de $MP_{2,5}$ e MP_{10} , respectivamente.

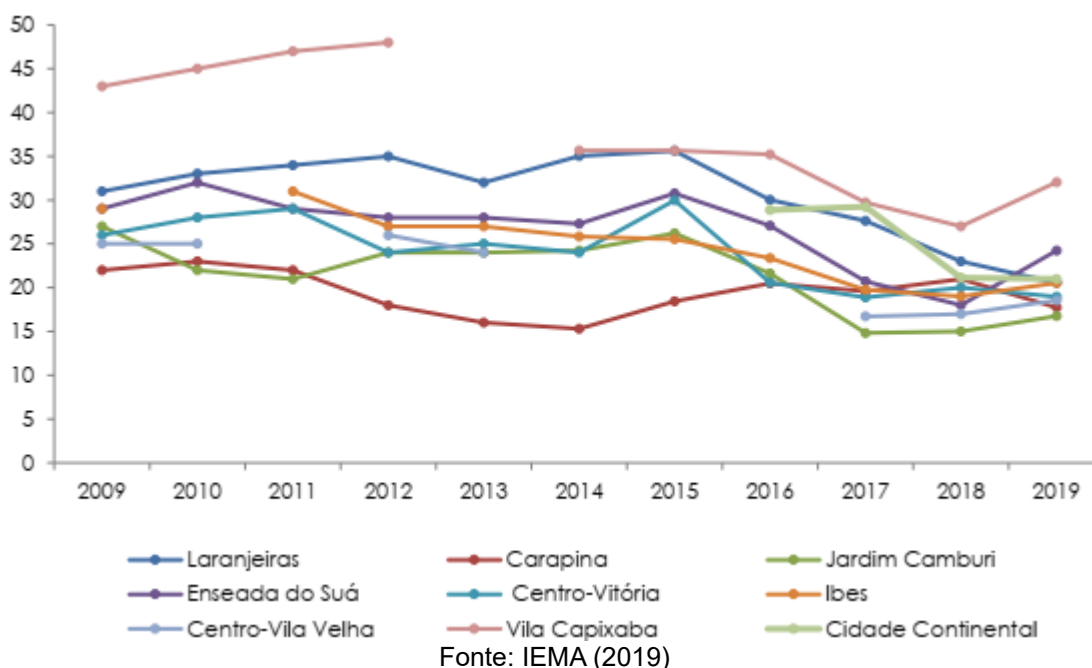
Figura 11 - Médias aritméticas anuais de $MP_{2,5}$ em microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fonte: IEMA (2019)

Figura 12 - Médias aritméticas anuais de MP_{10} em microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

15 Conforme diretrizes da qualidade do ar de 2005, vigentes na época do relatório de 2019.



Para o MP_{10} , que são as partículas inaláveis, em relação ao limite da Organização Mundial de Saúde de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver nota 15, página anterior), as ultrapassagens de máximas médias de 24h se deram num número muito maior de estações: Centro de Vitória ($59,7$ e $60,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$); Enseada do Suá ($118,2$ e $118,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$); Ibes ($53,1$ e $53,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$); Laranjeiras ($68,0$ e $68,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e Vila Capixaba ($116,0$ e $122,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Destas, as duas primeiras se localizam em Vitória-ES (IEMA, 2019). Com exceção da estação Centro-Vitória, todas as demais também transpuseram o parâmetro referente às médias aritméticas anuais em comparação ao valor de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendado pela OMS. A distribuição do material particulado possui relação direta com a direção do vento, análise possível graças ao monitoramento da concentração de poluentes aliada ao da velocidade e direção dos ventos (IEMA, 2019).

Com os valores de concentrações resultantes do monitoramento, é possível calcular o Índice de Qualidade do Ar (IQA_r). Realiza-se este procedimento para cada estação de monitoramento e toma-se a precaução de divulgar o pior resultado encontrado. Este indicador é útil para apresentar ao público as condições de pureza atmosférica de maneira acessível. Pode assumir valores de 0 a 200 (adimensional) e quanto mais alto, significa que pior está a situação (Tabela 3). Os valores são classificados em faixas de qualidade, como: BOA (0 a 40), MODERADA (40 a 80), RUIM (80 a 120), MUITO RUIM (120 a 200) ou PÉSSIMA (>200) (IEMA, 2019).

“A qualidade do ar é considerada BOA quando as diretrizes da OMS estão sendo atendidas. Por outro lado, a qualidade do ar é considerada MODERADA, quando as concentrações estabelecidas na legislação vigente [Decreto Estadual nº 3.464-R/2013 e Resolução CONAMA n 491/2018] estão sendo atendidas. Já as classificações RUIM, MUITO RUIM e PÉSSIMA são utilizadas quando as concentrações atingem os níveis apresentados na Tabela 6. Estas concentrações foram definidas com base nos cenários de ATENÇÃO, ALERTA e EMERGÊNCIA estabelecidos na Resolução CONAMA nº 491/2018 (IEMA, 2019, pág. 22)”.

Tabela 3 – Classificação da Qualidade do Ar na Grande Vitória a partir dos dados coletados pelas estações de monitoramento para médias horárias, de 8 e de 24 horas

Classificação ¹	Concentração*					
	MP ₁₀ 24h	MP _{2,5} 24h	SO ₂ 24h	NO ₂ 1h	O ₃ 8h	CO 8h
BOA	0 - 50	0 - 25	0 - 20	0 - 200	0 - 100	0 - 10.000
MODERADA	>50 - 120	>25 - 60	>20 - 60	>200 - 240	>100 - 140	>10.000 - 13.000
RUIM	>120 - 150	>60 - 125	>60 - 365	>240 - 320	>140 - 160	>13.000 - 15.000
MUITO RUIM	>150 - 250	>125 - 210	>365 - 800	>320 - 1.130	>160 - 200	>15.000 - 17.000
PÉSSIMA	>250	>210	>800	>1.130	>200	>17.000

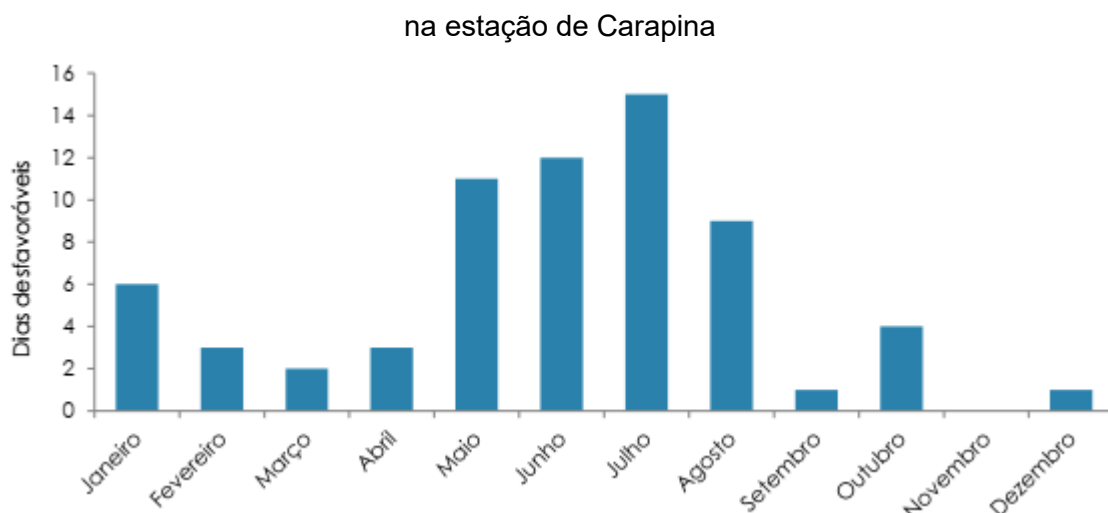
Fonte: IEMA, 2019

A Tabela 3 contém a descrição das classes, índices e valores limites de concentração representados em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pela tabela, com base nas concentrações de cada poluente, obtém-se as faixas de qualidade correspondentes.

Para o ano de 2019, na estação RAMQAr 4 (Enseada do Suá), 1% dos índices horários tiveram a classificação “Moderada” para a qualidade do ar externo (IEMA, 2019). Apesar de não haver registro de ocorrências para classificações “Ruim”, “Muito Ruim” ou “Péssimo”, observa-se que nos arredores desta região podem ocorrer episódios de ultrapassagem de parâmetros significando maiores níveis de poluição atmosférica.

Cabe considerar, também, a incidência de dias desfavoráveis à dispersão de poluentes, levando-se em conta as condições meteorológicas como incidência de chuvas e ventos. Infelizmente, o relatório da qualidade do ar de 2021, do IEMA, não foi publicado até a data de 02 de junho de 2022. Portanto, a Figura 13 apresenta a definição dos dias desfavoráveis referentes ao ano de 2019, que sinaliza a tendência de menores concentrações de poluentes nos meses de novembro e dezembro.

Figura 13 – Dias desfavoráveis à dispersão de poluentes no ano de 2019,

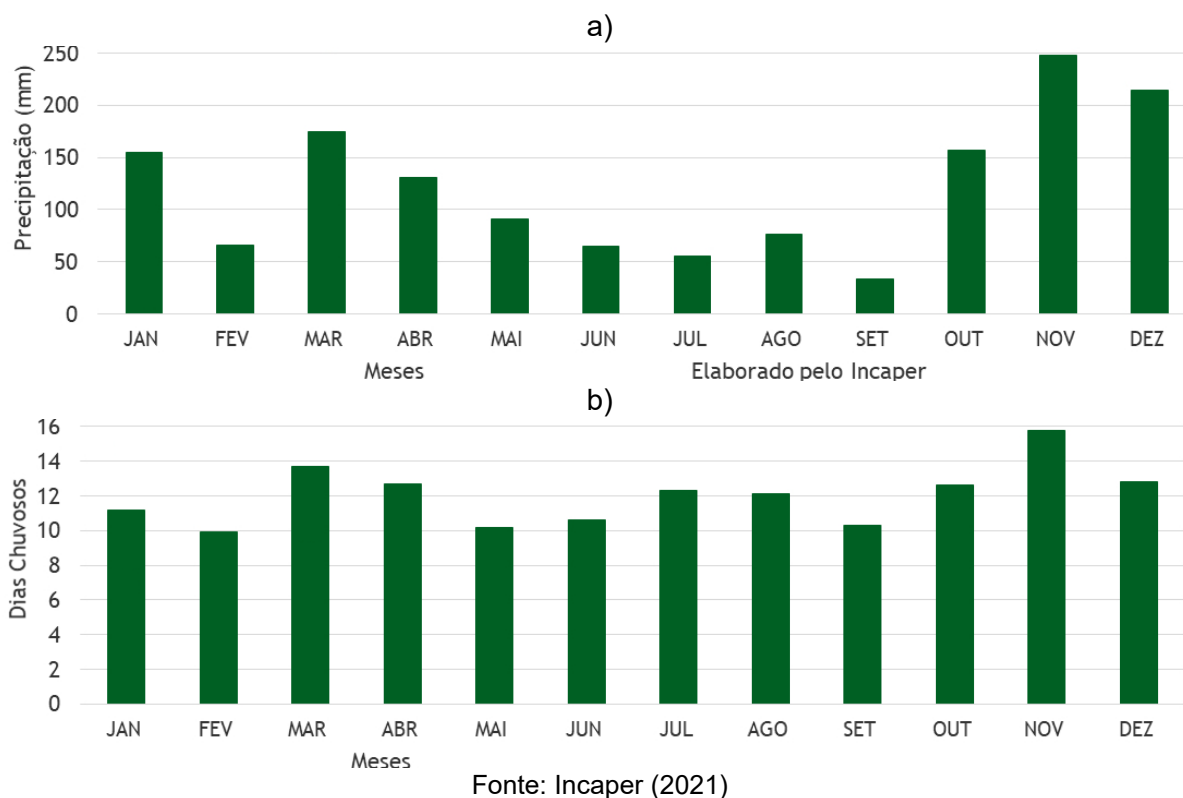


Fonte: IEMA (2019)

Sabe-se que o material particulado passa por diferentes processos que influenciam seu tempo de residência na atmosfera, como o assentamento (deposição seca), a coagulação e a deposição úmida. O grau de influência de cada processo depende do diâmetro aerodinâmico das partículas, além da densidade do ar, da viscosidade do meio, entre outros fatores (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018; BAIRD; CANN, 2011). A incidência persistente de chuvas promove a deposição úmida e contribui para a limpeza do ar urbano, pois transfere poluentes do ar para o solo por meio da precipitação (BAIRD; CANN, 2011).

Os meses mais chuvosos no município de Vitória-ES no que diz respeito ao volume de precipitação, e estão entre os quatro meses com maior número de dias chuvosos (INCAPER, 2021). Dados da precipitação podem ser observados na Figura 14.

Figura 14 - Precipitação mensal (a) e número de dias chuvosos (b) na estação de monitoramento de Vitória-ES (Goiabeiras). Dados referentes aos anos de 2007 a 2016



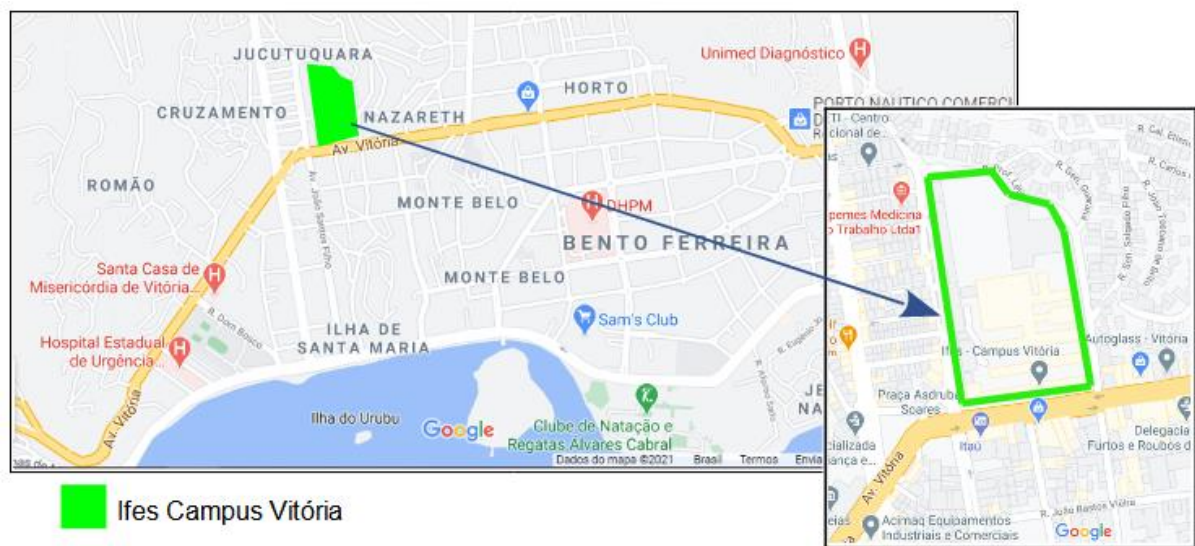
3.4 O Ifes Campus Vitória

O Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Ifes é uma instituição de ensino público referência para a sociedade capixaba que teve seu início em 1909, e completou, em 2021, 112 anos de existência.

Sua estrutura conta com 22 campi e 49 polos de apoio à educação a distância, espalhados em vários municípios do estado. Oferta cerca de 60 cursos de graduação, 10 pós-graduações lato sensu e 11 mestrados (IFES, 2020). Abrange também cerca de 100 cursos técnicos em modalidades integradas, ensino de jovens e adultos (EJA) e técnicos pós-médio, totalizando aproximadamente 36.000 alunos/ano.

O Campus Vitória do Ifes se localiza no bairro Jucutuquara, às margens de uma das vias arteriais de maior importância no município, com grande tráfego de automóveis, ônibus e caminhões, a Avenida Vitória (ver Figura 15). Situa-se, portanto, dentro da região de monitoramento da qualidade do ar do IEMA, entre duas estações de monitoramento: Enseada do Suá (a 3150 m, aproximadamente) e Centro de Vitória (a 1.730 m, aproximadamente).

Figura 15 – Localização do Campus Vitória na Avenida Vitória, em Jucutuquara



Fonte: adaptado de Google Maps (2020)

A Avenida Vitória fez parte do projeto de ampliação da cidade (1896), o Novo Arrabalde, do engenheiro sanitarista Francisco Rodrigues Saturnino de Brito, durante o governo de Muniz Freire (PMV, 2019). Nessa via, em média, circulam 61.638 veículos diariamente, sendo 1.014 caminhões, 1.747 ônibus, 13.877 motos e 42.480 automóveis, segundo a Prefeitura Municipal de Vitória (MONTEIRO, 2020). A avenida serve a 11 bairros e é rota de conexão entre Vitória e os municípios da Serra, Vila Velha e Cariacica.

3.5 Seleção dos ambientes monitorados

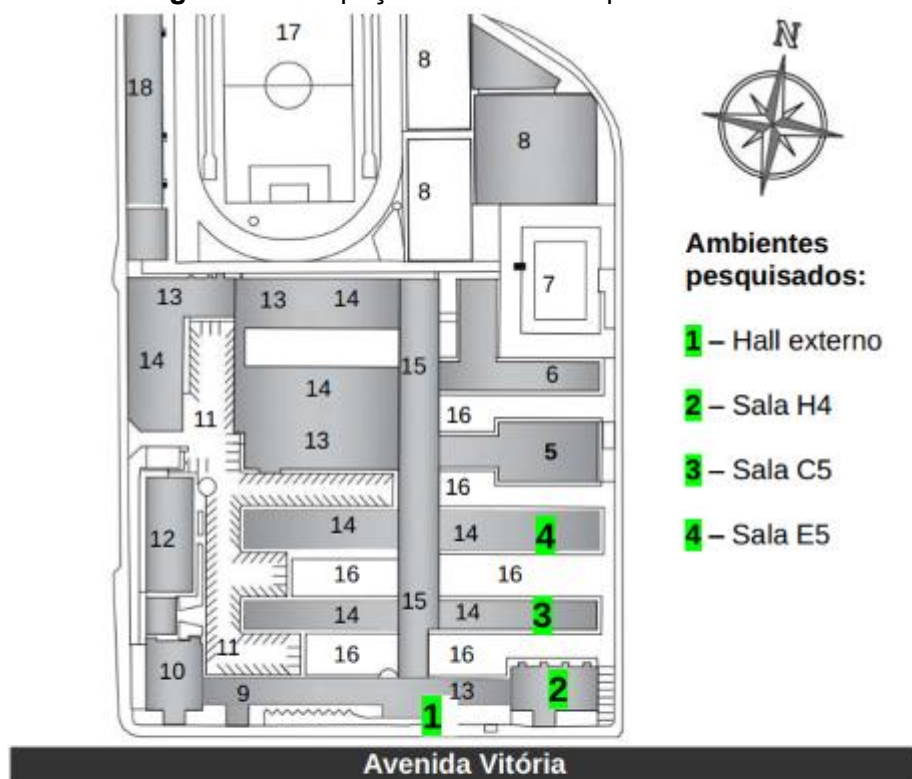
O local deste estudo é uma instituição educacional. Devido à natureza do uso, não há: lareiras, uso de queimadores a gás (exceto na cozinha), consumo de tabaco e utilização de incensos próximo às salas e tampouco nos pátios e corredores.

Evitou-se a escolha de salas próximos à cantina e restaurante, distando-se destes locais mais de 30,00 m, intermediados por jardins e pátios livres e descobertos. Da mesma forma, as salas adotadas nesta pesquisa estão distantes dos estacionamentos da escola mais de 40,00 m.

Optou-se por um ambiente mais próximo da principal via de tráfego da região, a Avenida Vitória, para avaliar a influência do tráfego de veículos aos ambientes educacionais do Ifes Campus Vitória. As demais salas são gradativamente mais afastadas deste logradouro.

A Figura 16 apresenta a localização das salas selecionadas para monitoramento dentro do Campus Vitória, do Ifes. Também apresenta, de maneira geral, os usos principais dos demais locais da Instituição. O *hall* externo (n° 1) é o local de acesso principal de alunos.

Figura 16 – Espaços selecionados para monitoramento



Legenda:

5) biblioteca; 6) cantina; 7) piscina; 8) quadra esportiva; 9) diretorias e secretarias; 10) teatro; 11) estacionamento; 12) administração; 13) laboratórios; 14) salas de aula; 15) pilotis; 16) jardim; 17) campo de futebol; 18) arquibancadas;

Fonte: o autor (2022)

3.5.1 Características dos ambientes monitorados

As salas de aula escolhidas estão em edificações com estrutura em concreto armado, paredes em alvenaria de blocos cerâmicos, revestimentos em argamassa de cimento e areia e acabamento em pintura acrílica ou PVA. Todas as salas contêm piso em granilite e esquadrias de alumínio. Seus ambientes apresentam solução típica de ventilação, que utiliza ar-condicionado split para climatização e, para ventilação, janelas em alumínio anodizado natural e vidro.

Apesar de possuírem aparelhos de ar-condicionado, o protocolo de saúde determinou que, em virtude da pandemia de Covid-19, as aulas fossem realizadas em ambientes apenas naturalmente ventilados, com uso de porta e janelas abertas durante a aula.

Os ambientes escolhidos foram denominados EXT, H4, C5 e E5, sendo o primeiro referente ao hall de entrada externo, na portaria principal de alunos. Os três últimos nomes se referem às salas de aula, segundo a nomenclatura da escola. As Figuras 17 a 20, a seguir, representam os espaços escolhidos. A Tabela 4 resume as características construtivas dos ambientes.

Tabela 4 – Características construtivas dos ambientes monitorados

Sala	Área de piso (m ²)	Volume interno (m ³)	Nº janelas	Área nominal de janela	Orientação das janelas	Nº de portas / dimensões (m)	Funcionamento das janelas / nº folhas (cada janela)
H4	47,95	150,08	02	6,40 m ²	S/SE	01 / 0,80 x 2,10	Correr / 4
C5	53,99	183,57	02	14,76 m ²	S/SE	01 / 0,95 x 2,10	Maxim-ar /10
E5	86,00	292,40	02	14,76 m ²	S/SE	01 / 0,98 x 2,10	Maxim-ar /10

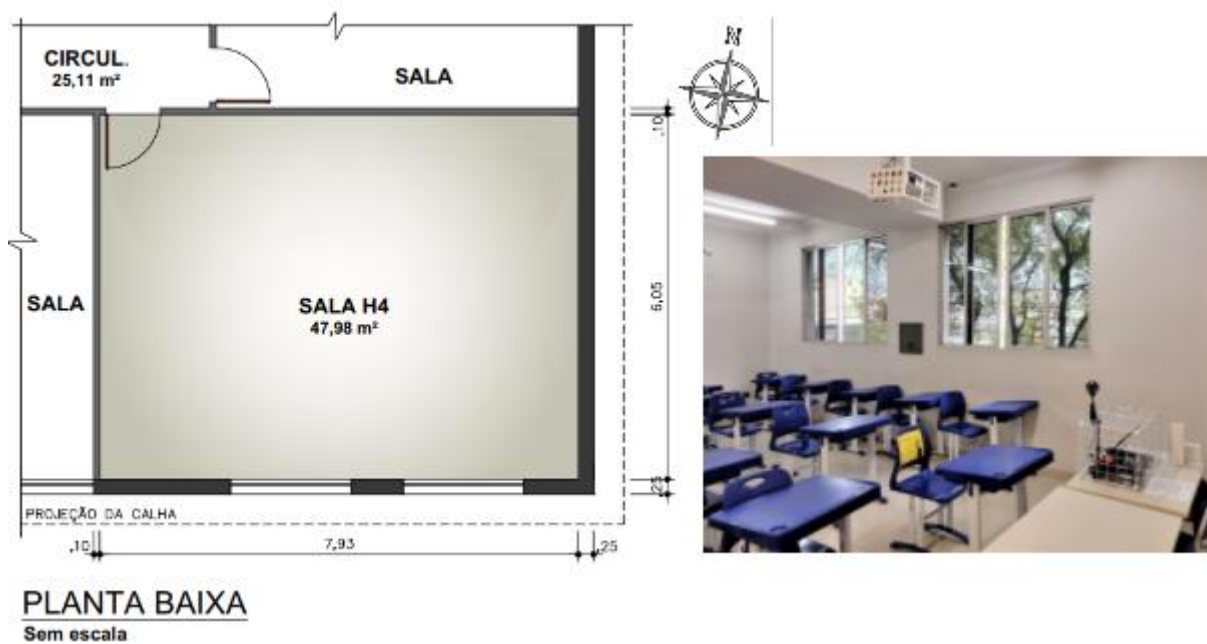
Fonte: o autor (2022)

Apesar de possuir ventiladores de teto na sala C5, estes equipamentos não foram utilizados durante essa pesquisa devido ao protocolo em combate ao Covid-19.

Figura 17 – Planta (a) e fotografia (b) da Sala H4

(a)

(b)

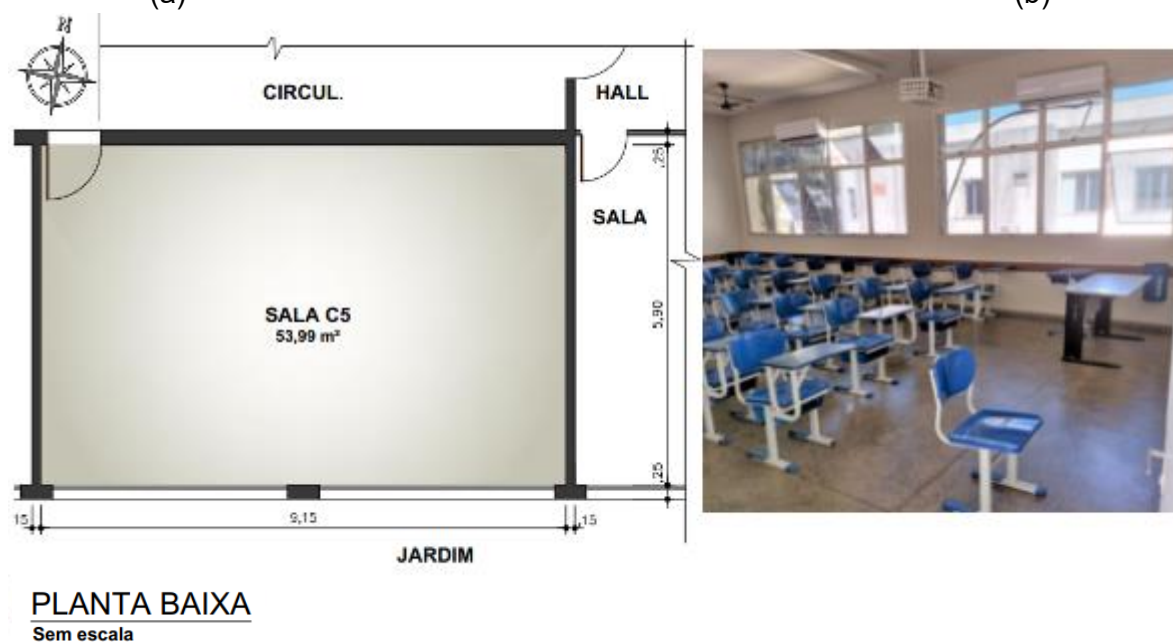


Fonte: o autor (2022)

Figura 18 – Planta (a) e fotografia (b) da Sala C5

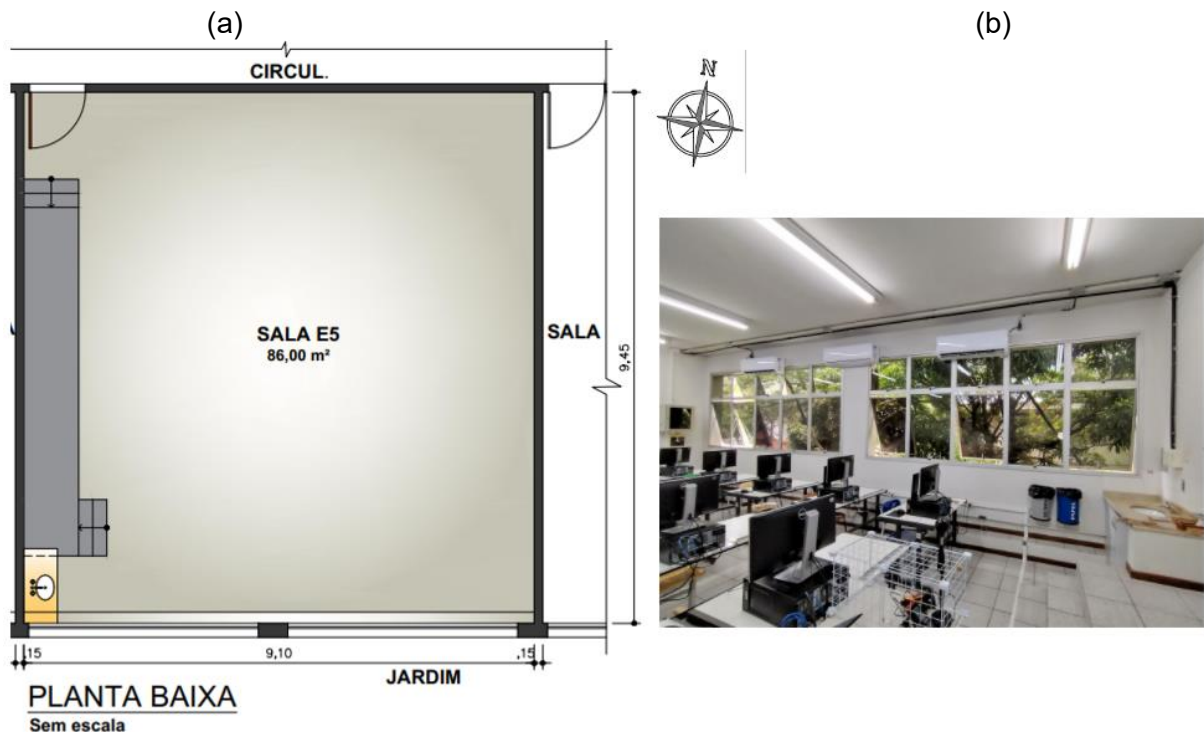
(a)

(b)



Fonte: o autor (2022)

Figura 19 – Planta (a) e fotografia (b) da Sala E5



Fonte: o autor (2022)

O ambiente EXT se refere ao hall de entrada, junto à portaria principal, voltada para a Avenida Vitória. É um ambiente aberto, sem área de piso ou volume definidos. Por isso, seu monitoramento se deu com objetivo de permitir a comparação com os dados das salas de aula.

Figura 20 – Ambiente externo (portaria)



Fonte: o autor (2022)

3.6 O experimento de campo

A partir de março de 2020, no Brasil, as instituições de ensino suspenderam as aulas em função da pandemia do Covid-19 e, em seguida, deram continuidade por meio do ensino remoto até aproximadamente maio de 2021. A partir desta data, gradativamente, os estados retornaram com ensino híbrido e, em seguida, presencial (UNESCO, 2021; BUENO; SOUTO; MATTA, 2021).

O Campus Vitória, do Instituto Federal do Espírito Santo, autorizou o retorno às aulas em outubro de 2021 para suprir demandas emergenciais em algumas turmas, em virtude do encerramento do semestre letivo. Somente em novembro de 2021, houve liberação para que as turmas em geral retornassem ao ensino presencial sob rigoroso protocolo de prevenção de contaminação com o vírus SARS-CoV-2, causador da Covid-19. Por esse motivo, o experimento de campo foi dividido em duas campanhas, conforme Quadro 3:

Quadro 3 – Resumo do experimento de campo

Etapa	Período	Características
Campanha 1	26 de julho a 01 de outubro de 2021	Salas de aula vazias. Alternadas semanas com janelas fechadas, parcialmente abertas e totalmente abertas. Ambientes: EXT, H4 e C5
Campanha 2	03 de novembro a 17 de dezembro de 2021	Período com ocupação. Aulas no turno matutino e vespertino. Ambientes: EXT, H4 e E5

Fonte: o autor (2022)

Em cada campanha, o monitoramento dos poluentes se deu de forma contínua e simultânea em três ambientes, conforme quadro 7, nos turnos matutino e vespertino (de 7h00 às 18h00). O levantamento de campo foi realizado entre segunda-feira e sexta-feira.

A mudança de sala de aula, na campanha 2, de C5 para E5, foi uma adequação necessária, pois todas as salas C não receberam alunos durante o mês de novembro. Ressalta-se que, nesse período, retornava-se o ensino presencial de

maneira incerta tanto pelos estudantes e gestores das instituições de ensino quanto pelos governantes.

Monitoraram-se, simultaneamente, as concentrações de CO₂, MP_{2,5} e MP₁₀., além da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (m/s). O Quadro 4 apresenta os instrumentos utilizados e suas características.

Quadro 4 – Instrumentos de medição e suas características

Modelo	Fotografia	Deteccção	Faixa de detecção e sensibilidade	Tipo de Sensor
Temptop M2000 2nd Generation		CO ₂	0 a 5000 ppm Resolução: 1 ppm Precisão: ± 50 ppm	Non-Dispersive Infrared Sensor (NDIR)
		MP _{2,5}	0 a 999 µg/m ³ Resolução: 0,1 µg/m ³ Precisão: ± 10%	Laser PM sensor
		MP ₁₀	0 a 999 µg/m ³ Resolução: 0,1 µg/m ³ Precisão: ± 15%	Laser PM sensor
Anemometer (Termo-hidro-anemômetro)		Temperatura	0 a 45 °C Resolução: 0,1 °C Precisão: ± 1,0 °C	Sensor de temperatura NTC
		Umidade	10 a 100 % Resolução: 0,1 % Precisão: ± 5%	Sensor de umidade capacitivo
		Velocidade do vento	0,0 a 45 m/s Resolução: 0,01 m/s Precisão: ± 3% ± 0,1	Sensor de molinete
OM-EL-USB-CO300		CO	0 a 300 ppm Resolução: 0,5 ppm Precisão: ± 4%	Infravermelho

Fonte: manuais dos fabricantes (2021)

Em cada ambiente, utilizaram-se três equipamentos para medição de poluentes durante o monitoramento da qualidade do ar. Foram eles: um monitor de qualidade do ar (1), um anemômetro (2) e um sensor de monóxido de carbono (3). Todos os instrumentos foram calibrados pelo fornecedor antes do início da campanha.

Os equipamentos foram posicionados sobre uma mesa, de forma que o monitor ficou posicionado numa base de 10 cm, o que totalizou 0,86 m de altura. Adotou-se a mesma altura para o sensor de CO. O sensor do anemômetro foi fixado a um pedestal, de maneira que sua hélice ficou à altura de 1,24 m. A figura 22 ilustra a instalação dos instrumentos sobre a mesa e pedestal.

Os instrumentos distaram de 1,70 a 1,90 m até a janela e de 1,60 a 1,70 m até o quadro do professor na sala H4. Essas medidas foram de 1,70 a 1,80 m até a janela e de 1,70 a 1,80 m até o quadro na sala C5. Para o ambiente E5, a distância foi de 2,60 m à esquadria e de 1,80 a 1,90 m ao quadro. Pequenas variações de posição ocorreram em virtude de movimentações realizadas pela equipe de limpeza ou pelos professores no início das aulas. Além disso, na campanha 2, o afastamento mínimo entre os equipamentos e qualquer usuário dos ambientes foi de 1,50 m.

3.6.1 Registro do comportamento adaptativo e da ocupação das salas de aula

Para registro do comportamento adaptativo dos ocupantes, da utilização do ambiente, suas janelas e porta, foi feito acompanhamento no local para cada período de ocupação, de acordo com os turnos (matutino e vespertino). O registro compreendeu o número de estudantes presentes, as características da atividade, a quantidade de abertura das janelas, entre outros aspectos, com base no trabalho de Korsavi, Montazami e Mumovic (2020).

O comportamento adaptativo registrado foi a ação de manter fechada ou abrir a janela baseado na ação de professores e alunos usuários do ambiente durante a ocupação (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020; KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020). Registrou-se, também, o número de folhas da janela utilizadas para abertura, como também a duração.

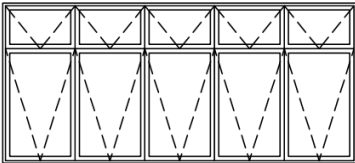
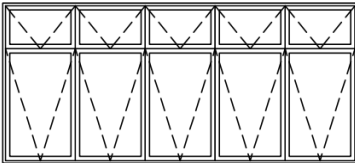
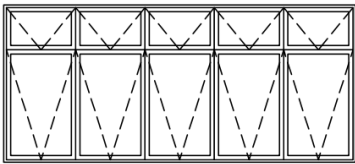
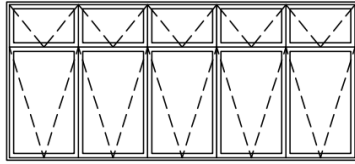
O objetivo foi observar os padrões de ocupação, adaptação e utilização em comparação aos níveis de poluentes e outros parâmetros monitorados. O Quadro 5 apresenta o modelo de formulário para acompanhamento do comportamento dos usuários e dos padrões de ocupação.

Quadro 5 – Exemplo de formulário de registro de ocupação, comportamento dos usuários e utilização das salas de aula

REGISTRO DIÁRIO DE COMPORTAMENTO, OCUPAÇÃO E UTILIZAÇÃO DA SALA DE AULA
--

Sala: _____	Nº de ocupantes: _____	Data: ____/____/____	Horário: _____
-------------	------------------------	----------------------	----------------

Quadro 9 - continuação

VARIÁVEIS	DADOS OBSERVADOS			
COMPORTAMEN- TO / UTILIZAÇÃO	Preencher tipo de atividade conforme campos abaixo:			
	☐ Sentados. Horários: _____	☐ Atividade de aula, em pé. Horários: _____	☐ Exercício ou dança. Horários: _____	☐ Avaliação (exame, prova) Horário: _____
PADRÃO DE UTILIZAÇÃO DE JANELAS E PORTAS	Preencher com dados sobre utilização da porta:			
	☐ Aberta em todas as aulas. ☐ Aberta em período parcial.		Neste campo, registrar o horário e a duração do fechamento da porta: _____	
	Preencher com informações sobre utilização das janelas:			
	Assinale com um ponto “●” a folha da janela que permaneceu fechada:  			
	Horário: _____			
 				
Horário: _____				
Observações: _____ _____ _____				

Fonte: adaptado de KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020.

3.6.2 Aplicação de questionários

Dois questionários foram aplicados nos períodos de ocupação, com objetivo de relacionar a percepção dos usuários quanto à qualidade do ar e os dados monitorados. As questões foram adaptadas do formulário utilizado na pesquisa de Haddad *et al.* (2021) e encontram-se disponíveis para consulta no Anexo 1.

O primeiro questionário aborda a percepção no momento da aplicação. As questões se referem à sensação de conforto dos usuários, e suas impressões quanto à qualidade do ar na sala de aula, entre outros aspectos.

O outro questionário levanta as condições de saúde dos usuários, como também as informações acerca das possibilidades de apropriação dos equipamentos de ventilação, como janelas e ar-condicionado. Também visa pesquisar as impressões, em geral, referentes ao conforto térmico e qualidade do ar interior.

Essa pesquisa foi aprovada no Comitê de Ética em Pesquisa por meio da Universidade Vila Velha, conforme parecer nº 5.128.945, sob protocolo na Plataforma Brasil CAAE: 50518321.5.0000.5064.

3.7 Análise Estatística

A análise dos dados foi feita com o apoio do Laboratório de Estatística (LESTAT¹⁶) do Departamento de Estatística da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES.

Para a análise dos dados quantitativos do monitoramento de poluentes, realizou-se uma análise descritiva e de regressão linear múltipla com objetivo de identificar correlações entre as variáveis. Ademais foram realizados testes de hipóteses ANOVA e *t-student*.

Quanto à análise dos dados dos questionários, inicialmente fez-se uma análise descritiva. Em seguida, em busca de associações entre as variáveis monitoradas que poderiam apresentar influência nas avaliações dos alunos, aplicou-se o teste de independência de qui-quadrado. Após essa etapa, utilizou-se a técnica de regressão ordinal para verificar a relação entre as variáveis, com intuito preditivo, para verificar a influência dos dados monitorados no ambiente sobre a avaliação a respeito da qualidade do ar realizada pelos ocupantes.

16 www.estatistica.ufes.br

Para o segundo questionário, adotou-se o teste de Kruskal-Wallis nos casos em que a pergunta oferecia mais de 02 categorias de respostas e o teste de Mann-Whitney para situações com apenas duas categorias, com intuito de identificar o efeito significativo de cada variável sobre as avaliações dos estudantes. Maiores detalhes da análise estatística estão contidos no Anexo 1.

4 RESULTADOS

O quarto capítulo apresenta os resultados da pesquisa, segundo os objetivos e procedimentos metodológicos adotados. De maneira geral, apresentam-se os resultados da primeira campanha, a relação entre os dois períodos de monitoramento e, em seguida, os resultados da segunda campanha incluindo os questionários.

4.1 – Campanha 1: período desocupado

No período de 26 de julho a 17 de setembro de 2021, empreendeu-se a primeira campanha de levantamento de campo, que se consistiu no monitoramento de três ambientes. Eles foram a área externa da portaria (EXT) e duas salas de aula: H4, de frente a avenida e C5, mais interna no campus. O monitoramento foi realizado em dias úteis, de 7h30 às 18h00.

Decidiu-se por três arranjos de janelas para a campanha 1. As configurações das salas de aula variaram semanalmente, o que é apresentado no Quadro 6. Em todos os arranjos de abertura, a porta foi mantida aberta durante o monitoramento. Todos os dias da primeira etapa foram caracterizados pela ausência de ocupação nos ambientes de ensino.

Quadro 6 – Configurações das janelas das salas de aula durante a campanha 1

Salas	Abertura de janelas	Período
H4 e C5	Máxima	26/07 a 30/07; 16/08 a 20/08; 13/09 a 17/09
	Parcial	02/08 a 06/08; 23/08 a 27/08
	Fechadas	09/08 a 13/08; 30/08 a 03/09

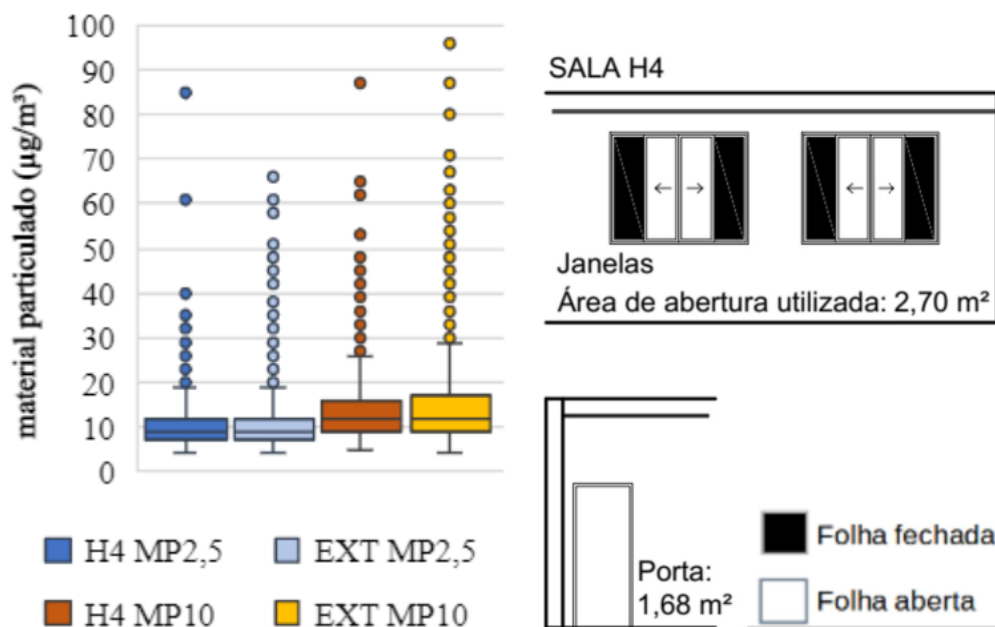
Fonte: o autor (2022)

4.1.1 – Influência da área de abertura das janelas e localização da sala de aula

A apresentação dos resultados da campanha 1 está dividida conforme a configuração de abertura de janelas adotada: máxima, parcial ou fechadas. A área de

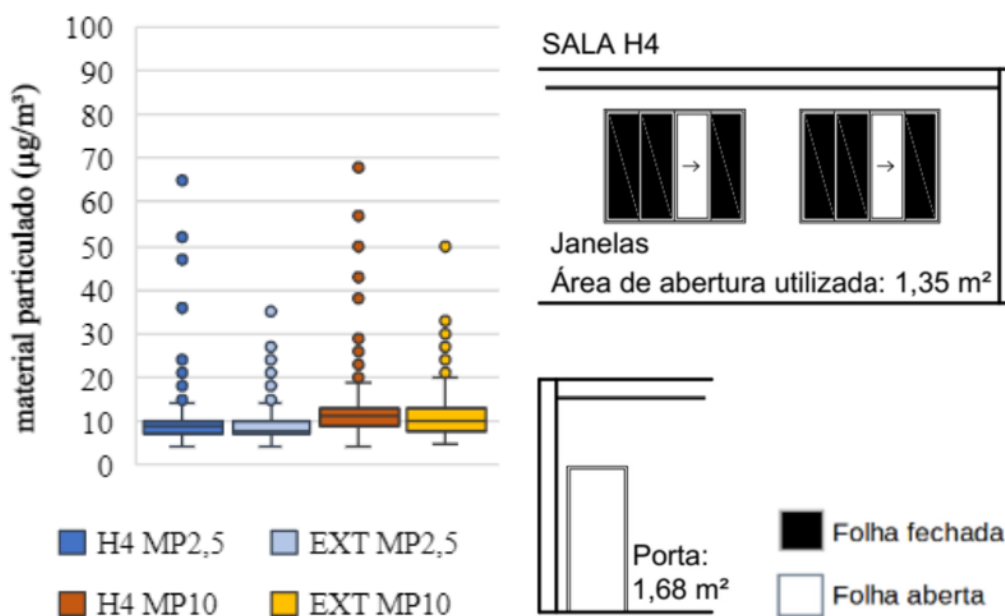
abertura em cada opção é apresentada nas imagens. Para material particulado, segundo cada configuração de janelas, são apresentados nas Figuras 21, 22 e 23.

Figura 21 - Concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} para os ambientes EXT e H4 para abertura máxima de janelas na sala de aula



Fonte: o autor (2022)

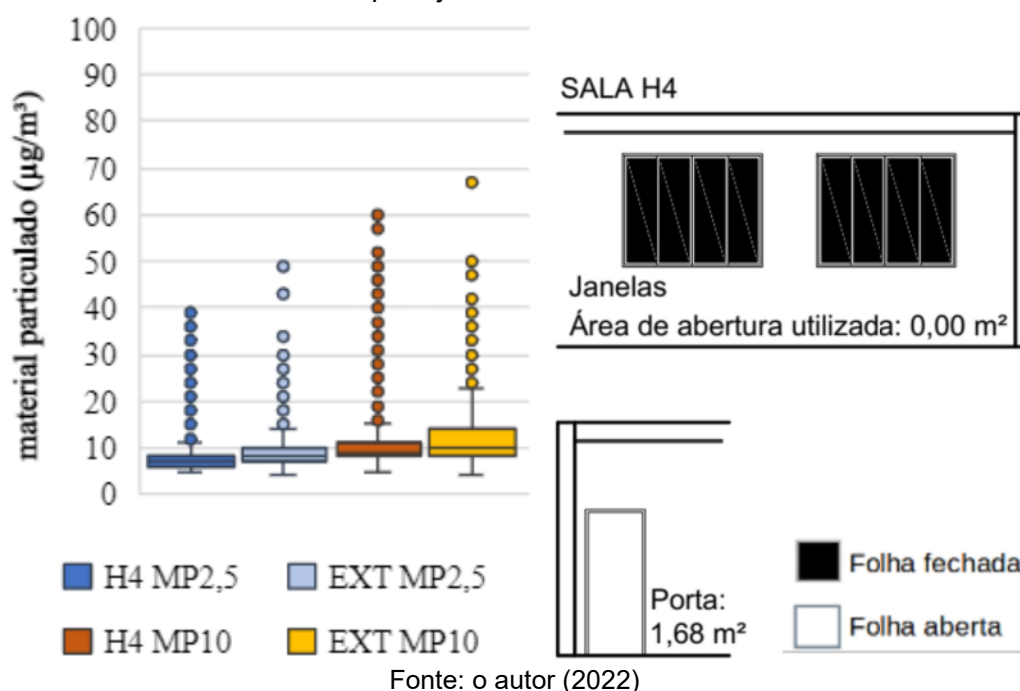
Figura 22 - Concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} para os ambientes EXT e H4 para abertura parcial de janelas na sala de aula



Fonte: o autor (2022)

Com base nos gráficos de distribuição, não são perceptíveis tendências de diferenciação nas concentrações de material particulado entre os ambientes EXT e H4 quando há utilização de janelas abertas. Nas opções de abertura máxima e parcial, os valores registrados para interior e exterior são muito semelhantes, indicando que a sala H4, próxima à avenida, pode ser afetada pela poluição do ar urbano de maneira análoga ao ambiente externo, mesmo estando recuada cerca de 6,00 metros da calçada, possuindo paredes e apenas a permeabilidade do ar pelas janelas.

Figura 23 - Concentrações de MP_{2,5} e MP₁₀ para os ambientes EXT e H4 para janelas fechadas



Fonte: o autor (2022)

Todavia, conforme o gráfico referente à configuração de janelas fechadas, percebe-se uma diferença entre os ambientes EXT e H4, com níveis menores na sala de aula. Possivelmente, a existência de frestas nessas janelas (de correr) e o fato de a porta ter sido mantida aberta permitiram certa contribuição da poluição exterior nos níveis de poluentes no ar da sala de aula (ver Figura 23).

A partir da avaliação da representação dos dados dos ambientes EXT e H4, lado a lado, observa-se que a variação nas concentrações de MP_{2,5} e de MP₁₀ não se deram somente pela mudança dos arranjos de janela, mas também por uma mudança geral nos níveis de poluentes no ar exterior.

Os dados apresentados na Tabela 5 apresentam as médias gerais, ou seja, referentes a todo o período de monitoramento. Os valores indicam que as concentrações de Material Particulado, no interior da sala de aula, estiveram ligadas

aos níveis externos, muito mais do que à configuração de janelas. Contudo, observa-se ligeira redução na sala H4 quando as janelas estão totalmente fechadas.

Tabela 5 - Análise das concentrações de MP_{2,5} e MP₁₀, em µg/m³, para a campanha 1

Poluente	Local	Abertura de janela / área	Mínimo	Média	Desvio padrão	Máximo	Mediana
MP _{2,5}	EXT	-	4	10,48	5,16	66	9
	H4	Máxima / 2,70 m ²	4	10,56	4,97	85	9
	EXT	-	4	8,50	2,82	35	8
	H4	Parcial / 1,35 m ²	4	9,05	3,01	65	9
	EXT	-	4	9,35	4,23	49	8
	H4	Fechada / 0,00 m ²	5	9,58	5,34	40	7
MP ₁₀	EXT	-	4	14,51	7,83	96	12
	H4	Máxima / 2,70 m ²	5	14,20	7,21	87	12
	EXT	-	5	11,18	4,16	50	10
	H4	Parcial / 1,35 m ²	4	11,81	4,01	68	11
	EXT	-	4	12,63	6,50	68	10
	H4	Fechada / 0,00 m ²	5	12,66	8,11	62	9

Fonte: o autor (2022)

Considerando as médias gerais representadas na tabela 4, não houve ultrapassagens em relação aos limites para médias de 24 horas especificados pela OMS para MP_{2,5} e MP₁₀, que são de 15 µg/m³ e 45 µg/m³, respectivamente. Todavia, conforme gráficos de distribuição (figuras 21, 22 e 23), houve variados registros que excederam esses limites. Além disso, chama atenção que as médias gerais de MP_{2,5} são superiores ao limite para média anual estabelecido pela OMS, que é de 5 µg/m³.

A tabela 6, a seguir, apresenta a distribuição de frequência para cada faixa de concentração segundo configuração de abertura adotada para a sala de aula. Segundo dados apresentados, em todas os arranjos de janelas adotados a maior ocorrência de registros ocorreu para concentrações entre 5 e 10 µg/m³.

Tabela 6 - Análise das concentrações de MP_{2,5}, conforme tipo de abertura, na campanha 1

	Faixas de concentração (µg/m ³)	Sala H4	Ambiente externo
		Frequência	Frequência
Abertura máxima	4 --- 5	3,55%	4,68%
	5 --- 10	60,83%	59,26%
	10 --- 15	22,97%	23,64%
	15 --- 20	6,02%	5,98%
	20 --- 30	6,29%	5,91%
	30 --- 45	0,31%	0,38%

45 --- 60	0,00%	0,12%
> 60	0,03%	0,02%

Tabela 6 - continuação

	Faixas de concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sala H4	Ambiente externo
		Frequência	Frequência
Abertura parcial	4 --- 5	3,01%	7,06%
	5 --- 10	77,05%	75,51%
	10 --- 15	16,73%	14,77%
	15 --- 20	2,77%	2,04%
	20 --- 30	0,30%	0,59%
	30 --- 45	0,06%	0,03%
	45 --- 60	0,06%	0,00%
	> 60	0,03%	0,00%
	Faixas de concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sala H4	Ambiente externo
		Frequência	Frequência
Janelas totalmente fechadas	4 --- 5	6,50%	7,55%
	5 --- 10	68,82%	67,63%
	10 --- 15	7,95%	13,10%
	15 --- 20	11,89%	9,47%
	20 --- 30	4,23%	2,14%
	30 --- 45	0,62%	0,09%
	45 --- 60	0	0,02%
	> 60	0	0,00%

Fonte: o autor (2022)

Conforme a tabela 5, observou-se que, para a abertura máxima, a sala H4 foi afetada pela poluição de maneira próxima ao ocorrido no ambiente externo, o que é demonstrado pela semelhança de valores na distribuição de frequência. O mesmo é notado para as configurações de abertura parcial e totalmente fechadas.

Chama atenção que, para o arranjo de janelas totalmente fechadas, houve maior ocorrência de concentrações superiores a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na sala de aula, se comparado ao mesmo período no ambiente exterior. Isso sugere que o fechamento de janelas pode contribuído para o maior registro de concentrações mais elevadas no ambiente interior. Todavia, a causa não foi identificada, dado que as salas de aula estiveram desocupadas nesse período de monitoramento.

A tabela 7 apresenta a distribuição de frequência para o MP₁₀, segundo abertura de janelas. Para cada arranjo de aberturas, as maiores frequências foram identificadas para concentrações entre 5 e 10 µg/m³ e entre 10 e 15 µg/m³.

Tabela 7 - Análise das concentrações de MP₁₀, conforme tipo de abertura, na campanha 1

Abertura máxima	Faixas de concentração (µg/m³)	Sala H4 Frequência	Ambiente externo Frequência
	4 --- 5	0,15%	0,67%
	5 --- 10	35,98%	35,14%
	10 --- 15	34,66%	33,25%
	15 --- 20	15,22%	16,37%
	20 --- 30	8,67%	8,30%
	30 --- 45	5,15%	5,85%
	45 --- 60	0,14%	0,30%
	60 --- 75	0,02%	0,07%
	75 --- 90	0,01%	0,02%
Abertura parcial	Faixas de concentração (µg/m³)	Sala H4 Frequência	Ambiente externo Frequência
	4 --- 5	0,66%	0,74%
	5 --- 10	40,13%	50,50%
	10 --- 15	47,05%	36,28%
	15 --- 20	8,78%	8,95%
	20 --- 30	3,19%	3,25%
	30 --- 45	0,09%	0,25%
	45 --- 60	0,06%	0,03%
	60 --- 75	0,03%	0,00%
	75 --- 90	0,00%	0,00%
Janelas totalmente fechadas	Faixas de concentração (µg/m³)	Sala H4 Frequência	Ambiente externo Frequência
	4 --- 5	0,21%	2,02%
	5 --- 10	64,30%	48,47%
	10 --- 15	12,75%	27,98%
	15 --- 20	4,59%	7,85%
	20 --- 30	14,25%	11,99%
	30 --- 45	3,27%	1,57%
	45 --- 60	0,60%	0,09%
	60 --- 75	0,03%	0,03%

75 --- 90	0,00%	0,00%
> 90	0,00%	0,00%

Fonte: o autor (2022)

Para o MP_{10} , a sala H4 apresentou registros muito semelhantes ao ambiente EXT quando houve abertura máxima. Isso reforça que o espaço com proximidade da avenida foi afetado pela poluição tal como o exterior. Com o fechamento parcial de janelas, na sala de aula, os registros foram menos frequentes no intervalo de 5 a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se comparado ao exterior. Além disso, para a faixa de 10 a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, as ocorrências foram mais frequentes na sala de aula.

Os dados também apontam que, para fechamento total de janelas, a sala H4 foi menos impactada pela poluição externa dado que, para faixas de concentração de 10 a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a frequência interna não acompanhou as elevações externas. Para essa configuração, a faixa de concentrações de 5 a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ compreendeu 64,30% dos registros na sala de aula, contra 48,47% no exterior.

No que diz respeito ao monóxido de carbono (CO), na maior parte do tempo, as concentrações estiveram abaixo do limite da OMS (WHO, 2021), que é de 3,49 ppm. Os resultados apontaram médias de 0,04, 0,09 e 0,55 ppm para os ambientes EXT, H4 e C5, respectivamente. Estes valores são condizentes com os encontrados por Razali *et al.* (2015) e por Majd *et al.* (2019).

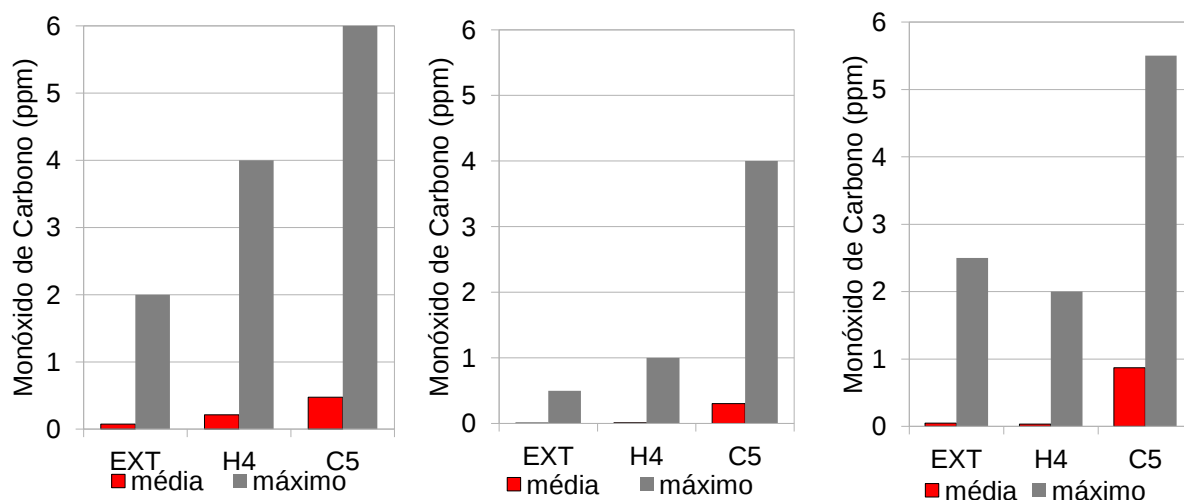
Conforme indicado na Figura 24, é perceptível que, em média, os valores são ligeiramente maiores na sala C5, mais afastada da avenida, o que sugere haver outra fonte próxima da escola para além da poluição causada pelo tráfego de veículos da via principal. Todavia, a origem não pôde ser determinada, com exatidão, sob suspeita da presença de um restaurante na Rua General Guaraná (rua lateral).

Figura 24 - Concentrações de CO para os ambientes EXT, H4 e C5, de acordo com as configurações de abertura: a) máxima, b) parcial e c) fechada.

a) máxima

b) parcial

c) fechada



Fonte: o autor (2022)

4.1.2– Influência de eventos externos nas concentrações internas

A presente subseção apresenta resultados de dias especiais devido a eventos específicos que influenciaram as concentrações de poluentes. Um incêndio ocorreu na manhã do dia 28 de julho de 2021 em Vitória, ES. A imprensa local reportou o acontecimento na Baía de Vitória, próximo à Ilha de Santa Maria, onde uma lancha em manutenção pegou fogo (G1 ES, 2021).

No campus Vitória, do Ifes, observou-se que a direção do vento estava favorável à escola, de forma que era perceptível o odor característico. Verificou-se também que, por volta de 11h00, havia uma coluna de fumaça visível a partir da estação localizada na portaria do edifício (ambiente EXT).

Sabe-se que as concentrações de poluentes no ar exterior podem variar em função da intensidade das emissões, da topografia local e das condições meteorológicas, como a temperatura ambiente, o regime de ventos, a umidade do ar, a estabilidade da atmosfera, entre outros (MELLER *et al.*, 2017).

A Tabela 8 apresenta a variação das concentrações de material particulado, em forma de médias horárias, nas estações localizadas nos espaços EXT e sala H4. Percebe-se o aumento nos níveis de partículas respiráveis (MP_{2,5}) e de partículas inaláveis (MP₁₀), com maior intensidade na média horária de 10h30min.

Tabela 8 - Variação de médias horárias de material particulado

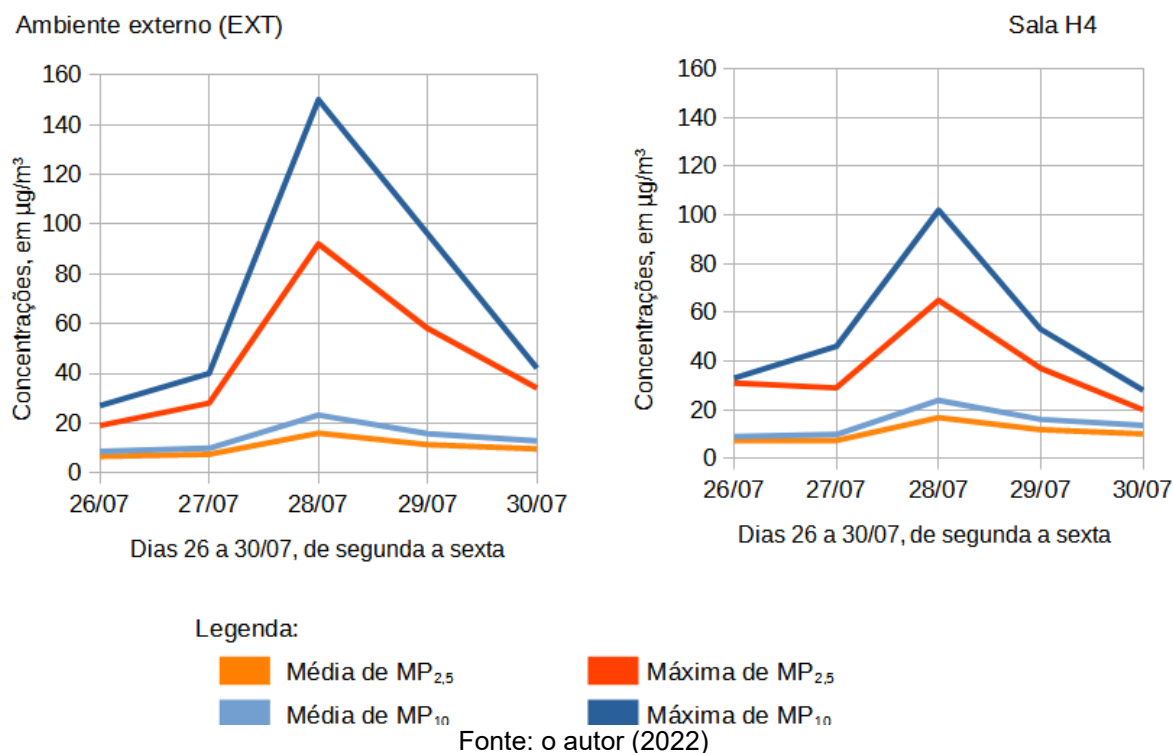
Data e hora	Ifes – Ambiente EXT		Ifes – Sala H4	
	MP 2,5 (µg/m³)	MP 10 (µg/m³)	MP 2,5 (µg/m³)	MP 10 (µg/m³)
28/07/2021 07:30:00	9,00	12,82	10,48	14,32
28/07/2021 08:30:00	8,83	12,17	8,23	10,87
28/07/2021 09:30:00	9,90	13,55	9,23	12,42
28/07/2021 10:30:00	39,33	60,82	41,73	61,42
28/07/2021 11:30:00	15,15	22,00	17,43	24,45
28/07/2021 12:30:00	17,33	26,10	20,64	30,18
28/07/2021 13:30:00	16,62	22,12	15,12	21,28
28/07/2021 14:30:00	12,65	17,75	12,82	17,68
28/07/2021 15:30:00	11,73	16,47	13,15	18,13
28/07/2021 16:30:00	14,10	20,13	15,38	21,75
28/07/2021 17:30:00	16,73	24,85	16,77	24,13
28/07/2021 18:30:00	19,71	30,00	20,28	29,72
Média	15,92	23,23	16,77	23,86
Mediana	14,63	21,07	15,25	21,52
Máxima média	39,33	60,82	41,73	61,42

Fonte: o autor (2022)

De acordo com os dados, percebe-se que a ocorrência desse incêndio foi capaz de impactar negativamente a atmosfera do entorno ao edifício escolar, verificado pelas concentrações registradas pelo equipamento externo. Além disso, causou piora significativa na qualidade do ar interno na sala de aula (H4), pois utilizou-se ventilação natural por meio da abertura total de janelas nesse dia.

A poluição do ar urbano, na Região Metropolitana da Grande Vitória, tem variadas origens, como a atividade industrial e o tráfego de veículos (IEMA, 2019). Entretanto, ao se compararem lado a lado as concentrações de material particulado na semana da ocorrência do incêndio, percebe-se que essa fonte específica influenciou negativamente os níveis de poluentes, conforme Figura 25.

Figura 25 - Concentrações médias e máximas de MP_{2,5} e MP₁₀ ao longo da semana



A concentração limite recomendada pelas diretrizes da qualidade do ar de 2021, da OMS, estabelecem o valor de 15 µg/m³ para MP_{2,5} e 45 µg/m³ para MP₁₀. Portanto, considerando os dados desse evento, houve ultrapassagens para o material particulado fino, devido às médias de 15,92 µg/m³ e 16,77 µg/m³, respectivamente, para EXT e H4 (e máximas de 92 µg/m³ e 65 µg/m³ para esses ambientes).

Apesar de as médias de MP₁₀ não ultrapassarem os parâmetros citados, as concentrações máximas alcançaram patamares múltiplas vezes maiores para essa classe de particulados, com 150 µg/m³ e 102 µg/m³ para o espaço externo e para a sala de aula, nessa ordem. Por se referirem a uma eventualidade, desconsideraram-se esses dados na análise geral da campanha 1, para evitar distorções.

Para efeito de comparação, outros dois incêndios foram identificados durante o monitoramento. O segundo ocorreu no dia 13 de agosto, e o terceiro no dia 15 de setembro de 2021 (G1 ES, 2021). Dados são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Dados registrados para os ambientes EXT e H4 nas datas dos incêndios

Data e turno	Local do incêndio	Temperatura e umidade	Direção do Vento	Configuração de janelas e porta na sala	MP _{2,5} (µg/m³)	MP ₁₀ (µg/m³)
--------------	-------------------	-----------------------	------------------	---	---------------------------	--------------------------

28/07/2021 (manhã)	Baía de Vitória, próximo à Ilha de Santa Maria	EXT: 26,2°C 72,5% H4: 24,8°C 70,6%	p/ Noroeste	Abertura máxima de janelas Porta aberta	EXT: Média: 15,92 Máxima: 92 H4: Média: 16,77 Máxima: 65	EXT: Média: 23,23 Máxima: 150 H4: Média: 23,86 Máxima: 102
13/08/2021 (manhã)	Avenida Beira Mar, Centro	EXT: 23,5°C 83,3% H4: 24,2°C 80,6%	p/ Nordeste	Fechamento total de janelas Porta aberta	EXT: Média: 21,41 Máxima: 48 H4: Média: 17,86 Máxima: 29	EXT: Média: 31,14 Máxima: 71 H4: Média: 24,99 Máxima: 44
15/09/2021 (tarde)	Avenida Vitória, Jucutuquara	EXT: 27,9°C 71,0% H4 —	p/ Sul	Abertura máxima de janelas Porta aberta	EXT: Média: 11,36 Máxima: 26 H4; Média: 11,16 Máxima: 15	EXT: Média: 15,82 Máxima: 36 H4; Média: 14,98 Máxima: 21

Observações:

a) As médias e máximas de MP_{2,5} e MP₁₀ se referem ao período de 7h30min às 18h00 no dia;

b) Nas três datas não houve ocupação da sala de aula.

Fonte: o autor (2022)

Em comparação ao dia 28/07, o incêndio ocorrido no dia 13/08 apresentou médias superiores. Apesar disso, as máximas alcançadas foram, em média, aproximadamente 53% menores. Ressalta-se que, a distância entre o local do evento à escola, no dia 13 de agosto, é muito superior à do primeiro caso (aproximadamente 2071 metros contra 907 metros)¹⁷.

Com relação ao dia 15 de setembro, em comparação ao primeiro caso relatado, houve reduzida influência do incêndio nas concentrações de particulados. Não houve ultrapassagens dos patamares da OMS (WHO, 2021) para médias de MP_{2,5} e nem para médias e máximas de MP₁₀. Ressalta-se que a distância do incêndio à escola era de aproximadamente 50 metros apenas, porém o sentido do vento era contrário à edificação.

Ao analisar-se estatísticas do Corpo de Bombeiros Militar do Espírito Santo (CBMES) apresentadas na Tabela 9, percebe-se que o número de ocorrências de incêndio pode passar despercebido no cotidiano, possivelmente pela sua distribuição no território. Contudo, não são eventos raros, mesmo se considerados apenas os registros no município de Vitória-ES.

17 Distâncias medidas por meio do sítio Geoweb Vitória. Disponível em: <https://geoweb.vitoria.es.gov.br/>

Tabela 9 - Atendimentos de incêndio realizados em cinco municípios da Grande Vitória (a) e especificamente no Município de Vitória - ES (b)

a)

MUNICÍPIOS DE VITÓRIA, SERRA, VILA VELHA, CARIACICA E VIANA						
TIPOS DE INCÊNDIO	2017	2018	2019	2020	2021	TOTAL
INCÊNDIO EM VEGETAÇÃO	433	539	1081	514	709	3276
INCÊNDIO EM VEÍCULO	290	293	261	247	214	1305
INCÊNDIO ESTRUTURAL	546	720	715	688	600	3269
INCÊNDIO (DIVERSOS)	238	331	417	305	366	1657
(INCÊNDIO NÃO TIPIFICADO)	12	10	12	6	3	43
TOTAL POR ANO	1519	1893	2486	1760	1892	9550
TOTAL NO PERÍODO	9550					

b)

VITORIA						
TIPOS DE INCÊNDIO	2017	2018	2019	2020	2021	TOTAL
INCÊNDIO EM VEGETAÇÃO	72	66	127	80	125	470
INCÊNDIO EM VEÍCULO	45	74	61	40	61	281
INCÊNDIO ESTRUTURAL	149	197	196	173	174	889
INCÊNDIO (DIVERSOS)	64	81	85	70	75	375
(INCÊNDIO NÃO TIPIFICADO)	3	0	4	3	0	10
TOTAL	333	418	473	366	435	2025
TOTAL NO PERÍODO	2025					

Fonte: CIODES / CBMES (2022)

A partir do momento em que se tem ciência da dimensão do número de ocorrências de incêndio, um total de 435 casos somente em 2021 na cidade de Vitória, percebe-se a importância do uso de equipamentos de medição e detecção no dia a dia, como também da existência de protocolos variados para cada situação, especialmente em espaços que agregam um grande número de pessoas por um longo período, como é o caso de salas de aula.

4.2 – Campanha 2: período ocupado

No Ifes, o retorno ao ensino presencial se deu a partir do dia 03 de novembro de 2021 (IFES, 2021) e o monitoramento, na campanha 2, foi feito do dia 03 de novembro até o dia 17 de dezembro de 2021.

Nesse período, a escola definiu um rigoroso protocolo de prevenção contra a transmissão da Covid-19 para a volta às aulas. As regras abrangeram múltiplas medidas de prevenção, como: uso obrigatório de máscara, disponibilidade de

dispensadores com álcool em gel, limitação da ocupação nos ambientes, distanciamento pessoal mínimo de 1,50 m, uso da ventilação natural (porta e janelas), aferição de temperatura nas portarias, entre outras.

As medidas incluíram também medidas de desinfecção nas salas de aula. Entre 15 e 30 minutos antes e após cada período de ocupação, a equipe de limpeza ficou a cargo de realizar a abertura das janelas e portas, como também higienizar mesas, cadeiras e objetos com álcool 70%.

Durante a campanha 2, foram coletadas as concentrações de CO₂, MP_{2,5} e MP₁₀. As mesmas variáveis foram observadas nas salas H4, E5 e no ambiente externo (EXT) - acesso à instituição de ensino, com registros a cada minuto. A Tabela 10 informa o resumo das concentrações de poluentes para a campanha 2.

Tabela 10 - Medidas resumo das concentrações de poluentes, considerando todas as configurações de aberturas de janelas e portas

	Local	Média	Desvio padrão	Máximo
CO ₂ (ppm)	H4	598	227	1786
	E5	808	303	2406
MP _{2,5} (µg/m ³)	H4	4,24	2,40	68
	E5	2,99	1,55	27
MP ₁₀ (µg/m ³)	H4	6,64	3,48	73
	E5	5,00	2,31	46

Fonte: o autor (2022)

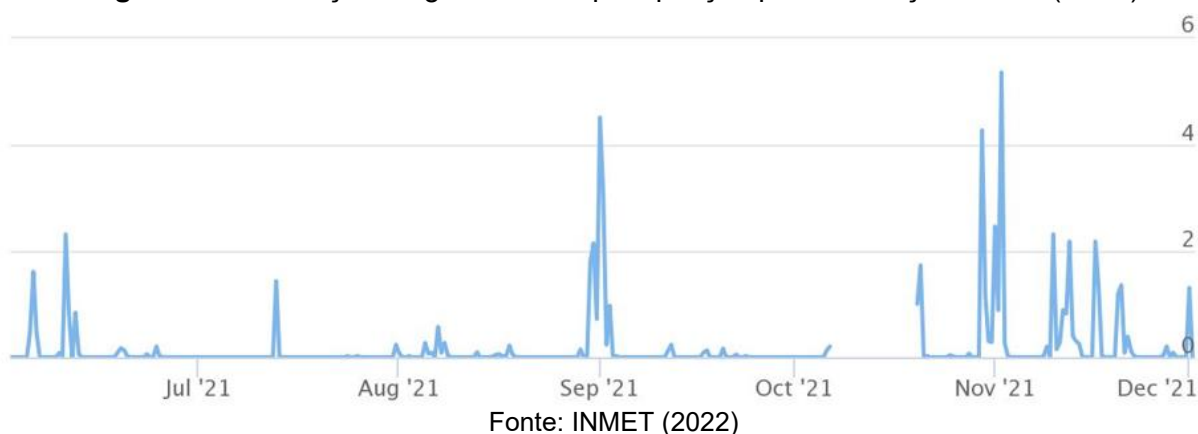
Pela análise geral dos dados, tem-se uma superioridade das concentrações de material particulado na sala H4 sobre a sala E5. Sabendo-se que o primeiro ambiente se localiza mais próximo da via de tráfego de veículos, e que a fonte principal desses poluentes é oriunda do ar exterior, percebe-se que o afastamento da avenida atua como atenuante nos níveis dos poluentes.

Todavia, ao longo da segunda campanha, em termos de médias, as concentrações de poluentes não apresentaram ultrapassagens aos níveis estabelecidos pelas diretrizes da Organização Mundial de Saúde - OMS, tanto para MP_{2,5} (média de 24 horas < 15 µg/m³), quanto para MP₁₀ (média de 24 horas < 45 µg/m³) e CO (média < 4 mg/m³ ou 3,49 ppm).

Quanto aos valores do ambiente externo (EXT), para o $MP_{2,5}$, a média registrada foi de $5,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e, para o MP_{10} , $8,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e, portanto, também abaixo dos limites da OMS para média de 24 horas, porém acima do limite para média anual para o $MP_{2,5}$, que é de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A incidência persistente de chuvas promove a deposição úmida e contribui para a limpeza do ar urbano, pois transfere poluentes do ar para o solo por meio da precipitação (BAIRD; CANN, 2011). A segunda campanha de monitoramento foi feita nos meses de novembro e dezembro, que são, historicamente, os meses mais chuvosos no município de Vitória-ES no que diz respeito ao volume de precipitação, e estão entre os quatro meses com maior número de dias chuvosos (INCAPER, 2021). A Figura 26 mostra os registros de precipitação para a estação Vitória, com predominância de chuvas em novembro e dezembro, em comparação aos demais (INMET, 2022).

Figura 26 – Condições registradas de precipitação para a estação Vitória (A612)



Observou-se, durante o monitoramento, a grande ocorrência de dias chuvosos, especialmente no final de outubro e durante o mês de novembro de 2021. Registros do Instituto Nacional de Meteorologia apontam a precipitação de 283,8 mm em novembro, acima da média histórica (INMET, 2022). A influência de altos índices de umidade relativa do ar, como também de chuvas, na redução dos níveis de particulados já foram verificados na região da Grande Vitória por outros estudos (PINTO; REISEN; MONTE, 2018).

Além da deposição úmida, outro aspecto favorável à redução das concentrações de poluentes no ar foi observado no local. Trata-se da prática de lavagem de pisos (limpeza úmida de pisos), realizada pela equipe de limpeza durante

a segunda campanha. Todos os pisos de corredores adjacentes às salas de aula passaram por esse procedimento, como também as salas de aula e pátios, no mínimo, duas vezes ao dia. Esse protocolo de limpeza evitou o acúmulo de material particulado e sua ressuspensão pelo trânsito de pessoas, o que já foi verificado por outros autores (ALVES *et al.*, 2014; PEREIRA, 2018).

Acrescenta-se, a esses dois fatores, o fato de que a redução de contaminantes no ar pode ser favorecida pela arborização local (tanto na primeira quanto na segunda campanha). Notoriamente, a superfície foliar está relacionada à remoção de poluentes atmosféricos e afeta as concentrações de material particulado menor que 10 μm , além de gases poluentes (NICODEMO; PRIMAVESI, 2009; JARDIM; CARDOSO; JESUS, 2021). Observou-se, no Ifes, a existência de arborização tanto urbana quanto ao longo da fachada, além do paisagismo integrado à implantação da edificação. A espécie *Licania tomentosa* (Oiti) está presente ao longo da fachada do Ifes Campus Vitória (Figura 27).

Figura 27 - Fileira de árvores junto à fachada principal do campus



Fonte: adaptado de Google Earth¹⁸

Soma-se o fato de que, no Ifes, uma fonte comum em salas de aula foi praticamente inexistente: a emissão de particulados pelo uso de giz. Na sala H4, o quadro dos professores era usado apenas com pincel e, na sala E5, a utilização de giz foi quase inexistente, ou seja, salvo em breves momentos em poucos dias, por se tratar de uma sala/laboratório de informática com projetor multimídia.

18 <https://earth.google.com/>

4.2.1 – Influência do uso das aberturas e da ocupação na concentração de MP

Além dos dados gerais de poluentes ao longo da campanha 2, é interessante averiguar a dinâmica temporal dos mesmos. Os gráficos a seguir (figuras 28, 29, 30 e 31) mostram a evolução temporal das concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} , em $\mu g/m^3$, e a ocupação dos ambientes H4 e E5 com o passar do tempo (expresso pelo número de registros feitos pelo equipamento). Nesses gráficos, as marcações em cinza simbolizam os períodos ocupados, com o respectivo número de pessoas acima da barra. Os espaços entre as barras cinzas (em branco) se referem a períodos em que as salas estiveram vazias. Os pontos coloridos representam o arranjo de janelas utilizados nos ambientes, sendo eles: sala com janelas e porta fechadas (vermelho), janelas abertas e porta fechada (amarelo), janelas fechadas e porta aberta (azul) e janelas e portas abertas (verde).

Dos gráficos de evolução a seguir (figura 28) é possível notar que não fica claro o efeito de aumento das concentrações pela ocupação da sala para o $MP_{2,5}$. Da mesma forma, para o MP_{10} (figura 29), não é perceptível o efeito da ocupação em suas concentrações, o que reforça a ideia da reduzida ressuspensão provocada pelos ocupantes, em função da prática de limpeza dos pisos e baixa movimentação durante as atividades de aula.

Figura 28 - Variação das concentrações de $MP_{2,5}$ conforme a ocupação e configuração de aberturas, ao longo do tempo, para a sala E5

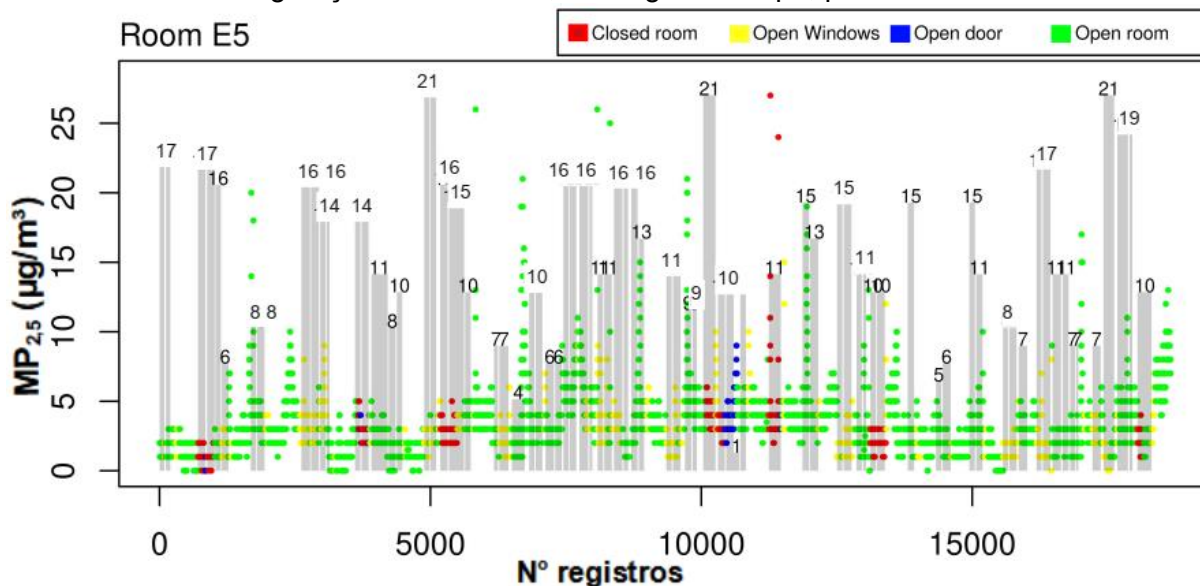


Figura 29 - Variação das concentrações de $MP_{2,5}$ conforme a ocupação e configuração de aberturas, ao longo do tempo, para a sala H4

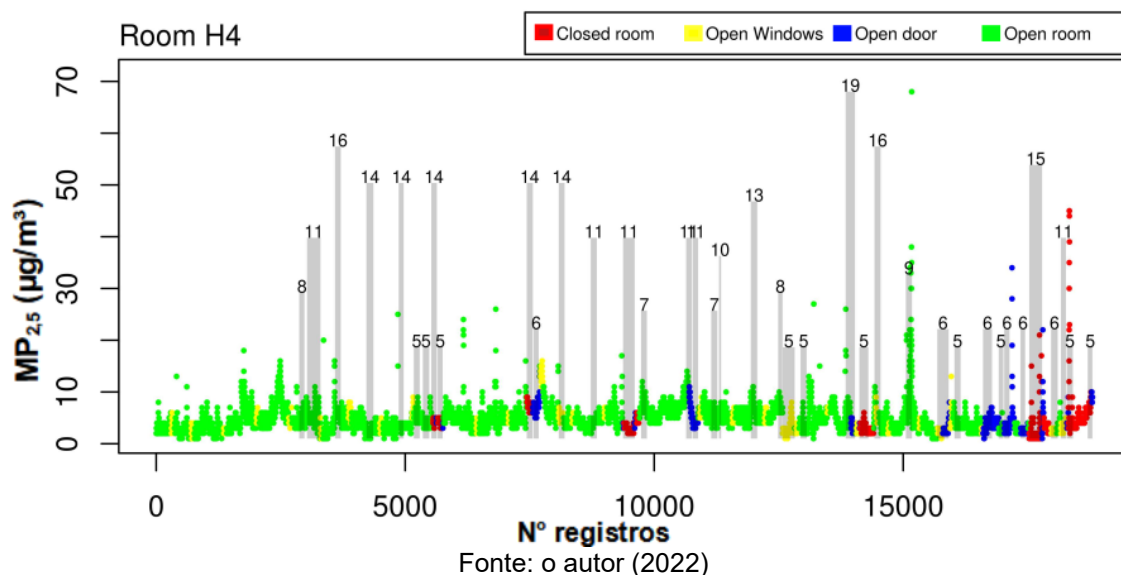
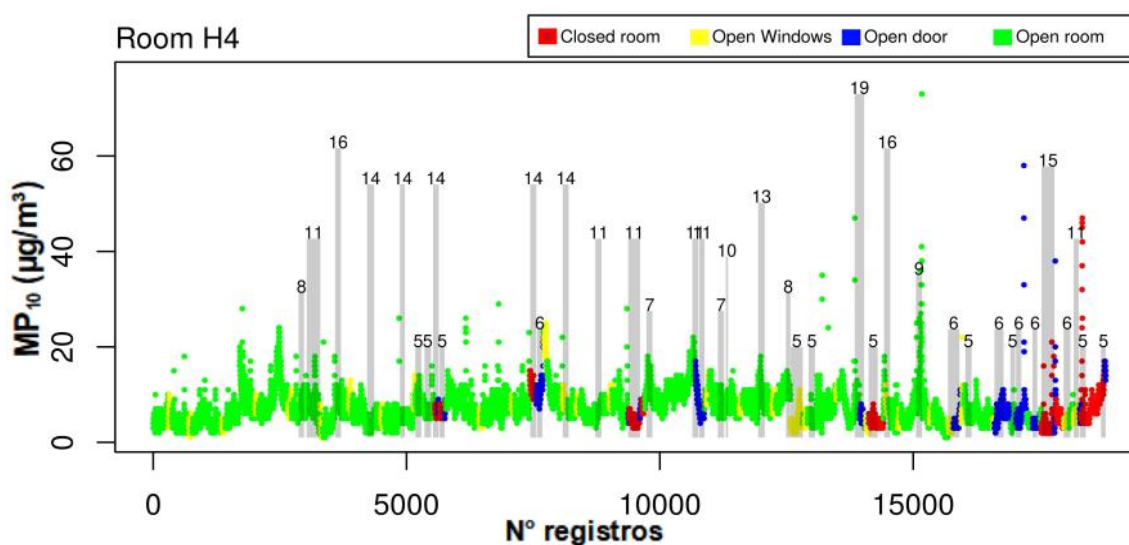
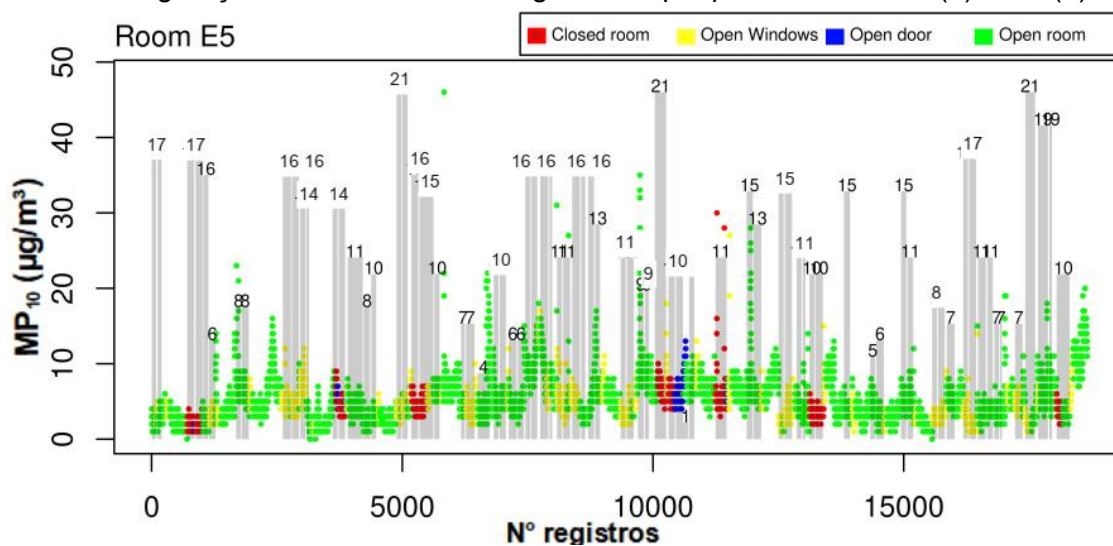


Figura 30 - Variação das concentrações de MP₁₀ conforme a ocupação e configuração de aberturas, ao longo do tempo, para as salas E5 (a) e H4 (b)



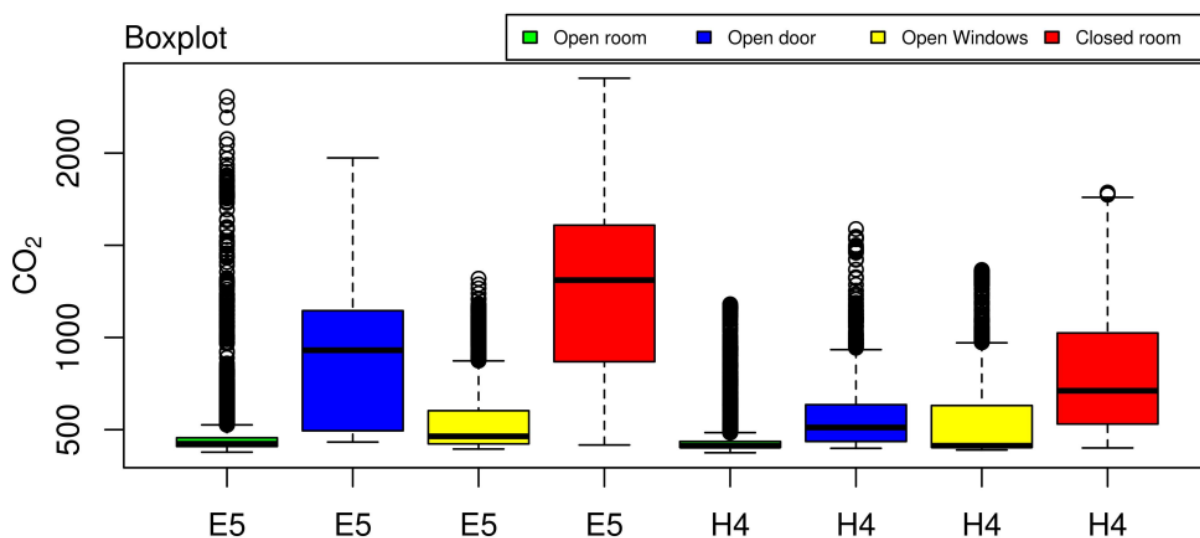
Pelos gráficos, é notável a diferença de comportamento do MP_{2,5} e do MP₁₀ entre as salas E5 e H4 devido às altas concentrações alcançadas, uma vez que, para esses poluentes, os valores pico foram muito superiores no ambiente mais próximo da avenida, que é a sala H4. Esse é mais um indicativo do aumento da influência da poluição externa devido à proximidade do ambiente da avenida.

De acordo com as figuras 28 e 29, percebe-se ainda que a maior parte das regiões em vermelho (sala totalmente fechada) se apresentam com baixas concentrações, um indicativo da tendência de redução dos níveis de particulados para o arranjo de fechamento das aberturas tanto na sala H4 quanto na E5, o que indica que as janelas tenderam a bloquear parte da poluição oriunda do exterior.

4.2.2– Influência do uso das aberturas e da ocupação na concentração de CO₂

O gráfico presente na figura 31 apresenta as distribuições das concentrações de CO₂ para as salas de aula durante a campanha 2 (período com salas de aula ocupadas). Cada cor identifica a respectiva configuração de abertura considerada na apresentação dos dados, sendo 04 tipos: em verde, sala aberta (*open room*), que se refere à utilização simultânea de janelas e porta; em azul, somente porta aberta (*open door*); em amarelo, somente janelas abertas (*open window*) e em vermelho, sala totalmente fechada (*closed room*).

Figura 31 – Distribuição dos registros de concentrações de CO₂ em função das aberturas adotadas



Fonte: o autor (2022)

De acordo com o gráfico, nota-se a relação entre a área da abertura e a renovação de ar no ambiente, expressa pelas concentrações de dióxido de carbono. Os melhores resultados, com os registros mais baixos de dióxido de carbono foram encontrados na situação de abertura simultânea de janelas e porta (*open room*, cor verde).

A abertura simultânea de porta e janelas provê maior área útil, se mostra mais favorável à ventilação cruzada e mais eficiente que a ventilação unilateral (só porta e/ou só janelas). Para cada ambiente, essa solução proporcionou concentrações menores se comparadas às aberturas exclusivamente de janelas ou porta e, sobretudo, à configuração totalmente fechada (*closed room*, em vermelho). Os valores elevados registrados para abertura total foram considerados pontos fora da curva na análise estatística e se devem, provavelmente, a breves momentos de fechamento de janelas pois, por vezes, houve queixas referentes ao excesso de barulho externo por parte dos ocupantes. O Quadro 8 apresenta as médias gerais de dióxido de carbono e as respectivas configurações de abertura.

Quadro 8 - Médias de CO₂ de acordo com as aberturas, por ambiente

Local	Configuração de abertura	Média de CO ₂ (ppm)
E5	Abertura simultânea de porta e janelas	456
	Somente porta aberta	938
	Somente janelas abertas	553
	Sala totalmente fechada	1283
H4	Abertura simultânea de porta e janelas	442
	Somente porta aberta	580
	Somente janelas abertas	535
	Sala totalmente fechada	835

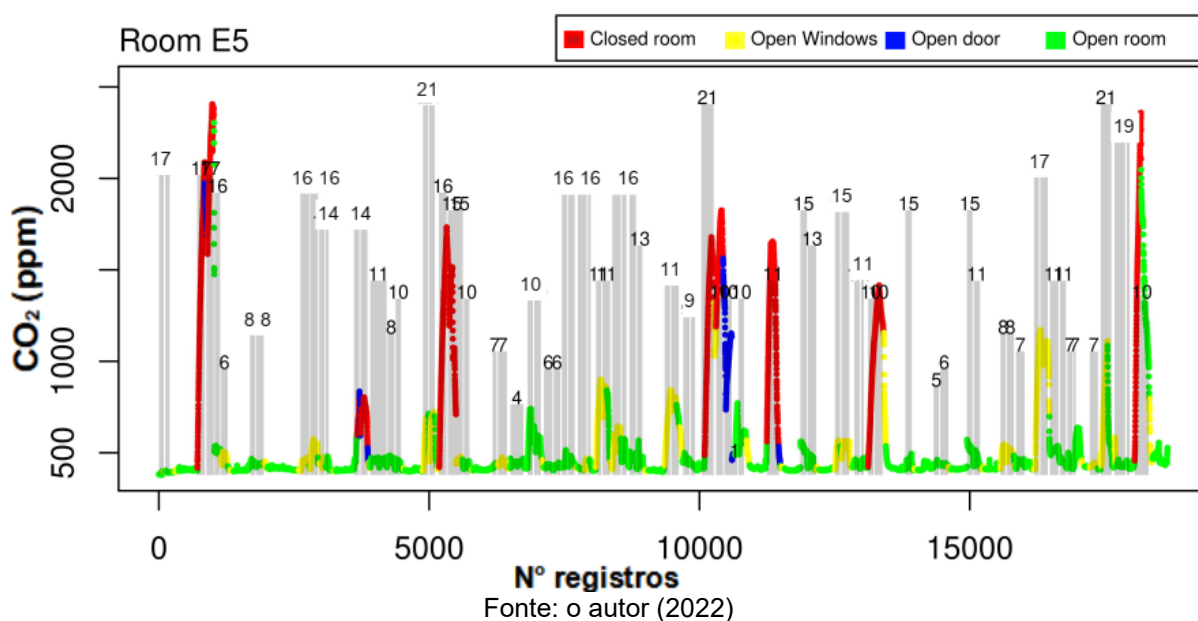
Fonte: o autor (2022)

No presente trabalho, em geral, observa-se que os níveis de CO₂ foram, mais baixos na sala H4. Isso pode ser explicado por dois fatores: foi observado que, por se tratar de uma sala usada por turmas de ensino superior (acima de 18 anos), houve menor rigor nos horários de entrada e saída na sala de aula. Tal fato causou maior aleatoriedade na abertura da porta, o que criou mais momentos de troca de ar, mesmo que curtos. Na sala E5, ocupada principalmente por turmas de ensino médio, houve maior rigidez nesse quesito. O segundo fator foi a presença de frestas nas

janelas da sala H4 mesmo quando fechadas, o que permite maiores infiltrações de ar nesse ambiente.

A Figura 32 apresenta a dinâmica temporal do dióxido de carbono em relação aos períodos ocupados (marcados em cinza) e períodos desocupados (sem marcação de cinza). Os números acima dos retângulos cinzas informam o número de pessoas no ambiente. Além disso, a figura representa com cores, a concentração de CO₂ alcançada para cada tipo de configuração de abertura durante o respectivo período ocupado.

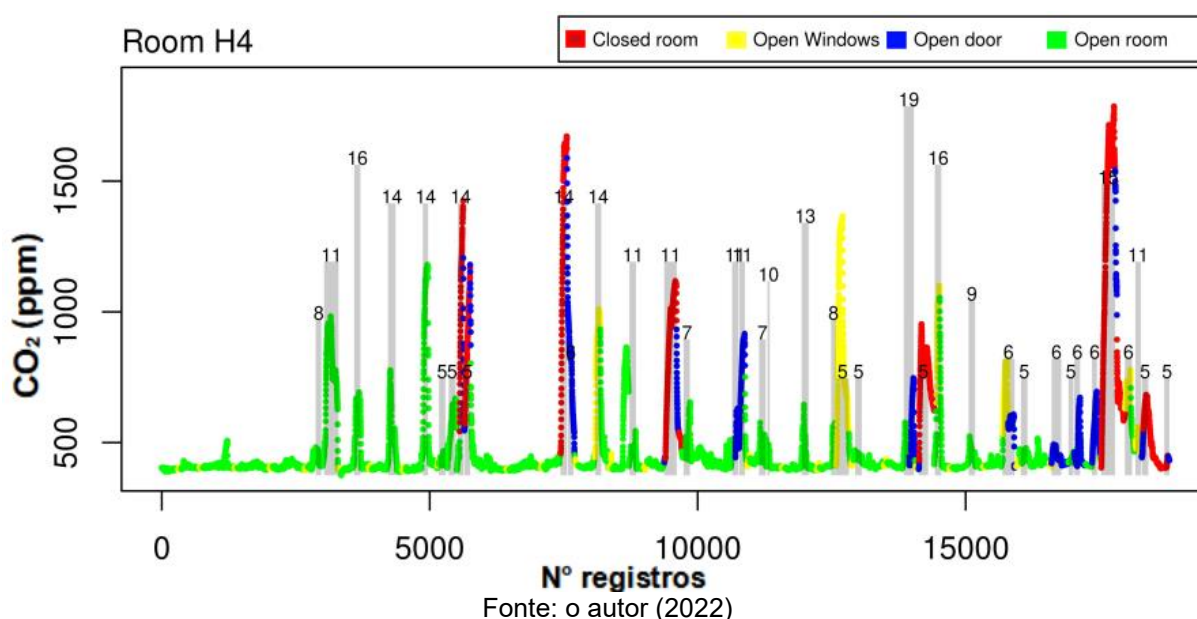
Figura 32 - Evolução temporal do CO₂ e períodos de ocupação (cinza) na sala E5



O gráfico acima indica claramente o alcance de maiores concentrações de gás carbônico para a configuração “totalmente fechada” (*closed room*), representada pelas marcações em vermelho. Além disso, em dois picos, no primeiro e no último, percebe-se a mudança de abertura para totalmente aberta e o declínio das concentrações. Notam-se os menores níveis desse gás quando a sala está com abertura simultânea de porta e janelas (*open room*), em verde, se comparadas às outras possibilidades, o que indica melhor eficiência da renovação de ar desse arranjo.

Situação semelhante é observável para a sala H4, por meio da Figura 33, com maiores níveis de CO₂ para fechamento total do ambiente. Os maiores picos são relativos ao arranjo de fechamento total (em vermelho). É perceptível que a configuração de abertura simultânea de porta e janelas, em verde, na maior parte das vezes, foi suficiente para manter as concentrações abaixo de 1000 ppm.

Figura 33 - Evolução temporal do CO₂ e períodos de ocupação (cinza) na sala H4



Porém, chama a atenção que, mesmo em alguns momentos de ocupação com abertura simultânea, os níveis tenham se aproximado e, por vezes, superado a marca de 1000 ppm. Isso pode ser explicado pela possibilidade, em breves momentos ao longo da aula, de fechamento das janelas e/ou a porta, pois havia a impressão negativa do ruído oriundo da avenida. Esse fator também foi reportado em outras pesquisas recentes (MUSCATIELLO *et al.*, 2014; BRDARIĆ *et al.*, 2019).

4.2.3 – Correlação entre os ambientes externo, interno e variáveis analisadas

Considerando o período ocupado (campanha 2), para verificação da relação entre variáveis monitoradas, utilizou-se a técnica de regressão linear múltipla para análise. De início, concluiu-se que o modelo normal não foi adequado, conforme teste de Shapiro-Wilks. Por isso, empregou-se a metodologia *bootstrap* para obtenção de *p*-valores corrigidos, que podem ser consultados nas Tabelas 11, 12 e 13, a seguir.

Tabela 11 – Estimativas dos coeficientes e respectivos *p*-valores do teste *t-student* para os dados de CO₂

Parameter	Estimate	Gaussian	Bootstrap
-----------	----------	----------	-----------

Intercept(a_0)	159.3955	0.1398	0.1500
Pol _{t-1} (a_1)	0.8161	0.0000	0.0005
Pol _{t,Ex} (a_2)	-0.2134	0.3801	0.3140
Oc _t (a_3)	16.5962	0.0000	0.0005
Ab _{t,porta} (a_4)	1.9940	0.7570	0.7680
Ab _{t,janela} (a_5)	-0.3446	0.8482	0.9770
Oc _t ·Ab _{t,porta} (a_6)	-5.4624	0.0000	0.0005
Oc _t ·Ab _{t,janela} (a_7)	-1.0283	0.0000	0.0005
Sala(a^*_0)	17.1475	0.9114	0.8875
Sala·Pol _{t-1} (a^*_1)	-0.2281	0.0000	0.0005
Sala·Pol _{t,Ex} (a^*_2)	0.1795	0.6107	0.5345
Sala·Oc _t (a^*_3)	16.4573	0.0000	0.0005
Sala·Ab _{t,porta} (a^*_4)	0.7553	0.9405	0.9395
Sala·Ab _{t,janela} (a^*_5)	0.7716	0.8852	0.9095
Sala·Oc _t ·Ab _{t,porta} (a^*_6)	-8.9045	0.0000	0.0005
Sala·Oc _t ·Ab _{t,janela} (a^*_7)	-0.1518	0.8770	0.8790

Fonte: o autor (2022)

Como resultados, em relação CO₂ interno, o efeito das concentrações de dióxido de carbono externas não é significativo, independente da sala de aula (a_2 e a^*_2 não significativos). A análise confirmou o efeito positivo da ocupação do ambiente para a configuração totalmente fechada ($a_3 > 0$ significativo), o que se mostrou mais significativo para a sala H4 ($a^*_3 > 0$ significativo), provavelmente devido à sua maior densidade ocupacional. Isso se deve ao fato de que os ocupantes são as principais fontes desse gás em ambientes interiores, fato já amplamente discutido em Kapalo *et al.* (2019) e Branco *et al.* (2015).

Outra constatação importante é revelada em cenários em que a sala de aula não está totalmente fechada (abertura de somente porta ou janelas). Nesse caso, a abertura ($Ab_{t,porta} > 0$ ou $Ab_{t,janela} > 0$, ou ambos) é capaz de reduzir o efeito positivo da ocupação nas concentrações internas de CO₂ ($a_6 < 0$ e $a_7 < 0$ significativos) sendo que, dos dois ambientes, a diminuição provocada pela abertura de porta é ainda mais acentuada na sala H4 ($a^*_6 < 0$ significativo).

Tabela 12 – Estimativas dos coeficientes e respectivos *p*-valores do teste *t-student* para os dados de MP_{2,5}

Parameter	Estimate	Gaussian	Bootstrap
Intercept(a_0)	0.4873	0.0119	0.0025
Pol _{t-1} (a_1)	0.7006	0.0000	0.0005
Pol _{t,Ex} (a_2)	0.1202	0.0000	0.0005
Oc _t (a_3)	-0.0296	0.0226	0.0060
Ab _{t,porta} (a_4)	-0.0192	0.7796	0.7200
Ab _{t,janela} (a_5)	-0.0425	0.0251	0.0110
Oc _t ·Ab _{t,porta} (a_6)	0.0065	0.3737	0.2610
Oc _t ·Ab _{t,janela} (a_7)	0.0036	0.0930	0.0470
Sala(a^*_0)	0.1471	0.5829	0.6120
Sala·Pol _{t-1} (a^*_1)	-0.0449	0.2939	0.3345
Sala·Pol _{t,Ex} (a^*_2)	0.0332	0.2280	0.2605
Sala·Oc _t (a^*_3)	0.0113	0.6388	0.6785
Sala·Ab _{t,porta} (a^*_4)	0.0401	0.7135	0.7145
Sala·Ab _{t,janela} (a^*_5)	0.0234	0.6746	0.7330
Sala·Oc _t ·Ab _{t,porta} (a^*_6)	0.0145	0.3840	0.4905
Sala·Oc _t ·Ab _{t,janela} (a^*_7)	-0.0054	0.6105	0.6660

Fonte: o autor (2022)

Diferentemente do gás carbônico, a análise revelou que os níveis externos de MP_{2,5} impactam de maneira positiva as concentrações internas do poluente ($a_2 > 0$ significativo). Se a sala não estiver totalmente fechada ($Ab_{t,porta} > 0$ ou $Ab_{t,janela} > 0$, ou ambos), a abertura de portas não afeta significativamente o efeito da ocupação nos níveis desse poluente, enquanto a abertura de janelas atenua a redução de MP_{2,5} provocada pela ocupação da sala ($a_7 > 0$ significativo). Segundo análise de regressão, a localização da sala não influencia nos resultados encontrados para essa variável (a^*_i não significativo para todo i).

Tabela 13 - Estimativas dos coeficientes e respectivos *p*-valores do teste *t-student* para os dados de MP₁₀

Parameter	Estimate	Gaussian	Bootstrap
Intercept(a_0)	0.5467	0.0351	0.0155
Pol _{t-1} (a_1)	0.6797	0.0000	0.0005
Pol _{t,Ex} (a_2)	0.1669	0.0000	0.0005
Oc _t (a_3)	-0.0408	0.0153	0.0095
Ab _{t,porta} (a_4)	-0.0251	0.7769	0.7295
Ab _{t,janela} (a_5)	-0.0568	0.0208	0.0110
Oc _t ·Ab _{t,porta} (a_6)	0.0098	0.3024	0.2600
Oc _t ·Ab _{t,janela} (a_7)	0.0042	0.1325	0.0845
Sala(a^*_0)	-0.0032	0.9929	0.9890
Sala·Pol _{t-1} (a^*_1)	-0.0342	0.3946	0.4240
Sala·Pol _{t,Ex} (a^*_2)	0.0568	0.0462	0.0900
Sala·Oc _t (a^*_3)	0.0091	0.7702	0.7815
Sala·Ab _{t,porta} (a^*_4)	0.0660	0.6398	0.6445
Sala·Ab _{t,janela} (a^*_5)	0.0131	0.8559	0.8670
Sala·Oc _t ·Ab _{t,porta} (a^*_6)	0.0116	0.5902	0.6440
Sala·Oc _t ·Ab _{t,janela} (a^*_7)	0.0019	0.8892	0.9025

Fonte: o autor (2022)

Para o MP₁₀, os resultados apontam que as concentrações internas também são influenciadas positivamente pelas externas ($a_2 > 0$ significativo). Com a sala desocupada (Oc_t=0), constatou-se que a abertura de porta não impacta significativamente os níveis desse poluente (a_4 não significativo) e que a abertura de janelas tende a reduzir as concentrações ($a_5 < 0$ significativo). De maneira similar ao MP_{2,5}, para o MP₁₀, a localização da sala não influencia nos resultados encontrados (a^*_i não significativo para todo i), um resultado controverso com base nos gráficos de distribuição temporal do material particulado entre as salas H4 e E5, pelos quais, visualmente, percebem-se maiores concentrações para o ambiente próximo à rua.

4.2.4 – Influência do comportamento adaptativo em relação aos sistemas de ventilação

Alguns dias da campanha 2 foram analisados a fim de representar as condições específicas de ocupação, abertura e ventilação e sua influência nas variáveis monitoradas no ambiente interno. As datas escolhidas são apresentadas aos pares, de maneira que possibilite a comparação entre configurações semelhantes.

4.2.4.1 – Fechamento total de janelas e portas. Uso de ar-condicionado.

A Tabela 14 apresenta dois dias distintos, um para a sala H4 e outro para a sala E5, nos quais houve fechamento total de janelas e portas durante o período de ocupação. Utilizou-se ar-condicionado nas duas salas nas respectivas datas.

Tabela 14 - Dados dos ambientes H4 e E5, nos dias 16 de dezembro e 04 de novembro

Data e horário	Local	Densidade ocupacional	Abertura de janela (m²)	Abertura de porta (m²)	Uso de ar-condicionado
16/12/2021 8h00 - 12h20	Sala H4	3,20 m²/p 10,01 m³/p	0	0	sim
04/11/2021 13h00 - 18h05	Sala E5	5,06 m²/p 17,02 m³/p	0	0	sim
		mínima	média	máxima	mediana
Sala H4	CO₂ (ppm)	397	1333,8	1786	1559
	Temperatura (°C)	23,4	26,77	29,5	27,5
	Umidade (%)	53,6	63,63	76,3	65,7
Sala E5	CO₂ (ppm)	417	1736,43	2406	1823,5
	Temperatura (°C)	22,9	24,23	27,7	23,7
	Umidade (%)	48,3	52,68	70,3	51

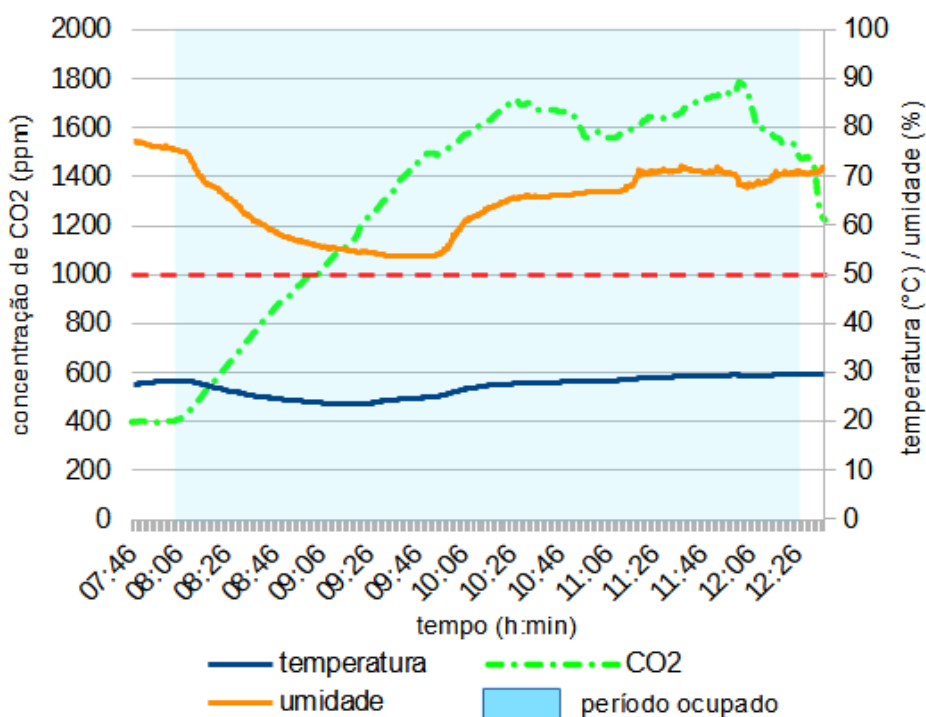
Fonte: o autor

Na sala H4, no dia 16 de dezembro, observa-se o aumento acentuado das concentrações de CO₂ devido à utilização de janelas e porta completamente fechadas após o início da ocupação. Mesmo partindo de 397 ppm, em apenas 1 hora e 04 minutos, atingiu-se o nível de 1000 ppm, limite considerado pela norma RE 09 (ANVISA, 2003). Alcançou-se o primeiro pico às 10h27min (1715 ppm), seguido de uma redução gradativa possivelmente devido a algumas saídas dos alunos nesse

horário sem, contudo, haver um intervalo coletivo. Após novo período de crescimento, a máxima de 1785 ppm é alcançada às 12h00. A partir desse momento, houve nova redução devido à saída gradual dos alunos (Figura 34).

Nesse ambiente, a porta e janelas foram fechadas no início da aula. A taxa de aumento da concentração de CO₂, do início da ocupação ao primeiro pico, foi de 8,96 ppm/min. Ao final da aula, a abertura da porta (1,68 m²) ocasionou uma taxa de redução de 15,0 ppm/min durante os primeiros 30 minutos.

Figura 34 - Ocupação com janelas e porta fechadas, com uso de ar condicionado – sala H4.



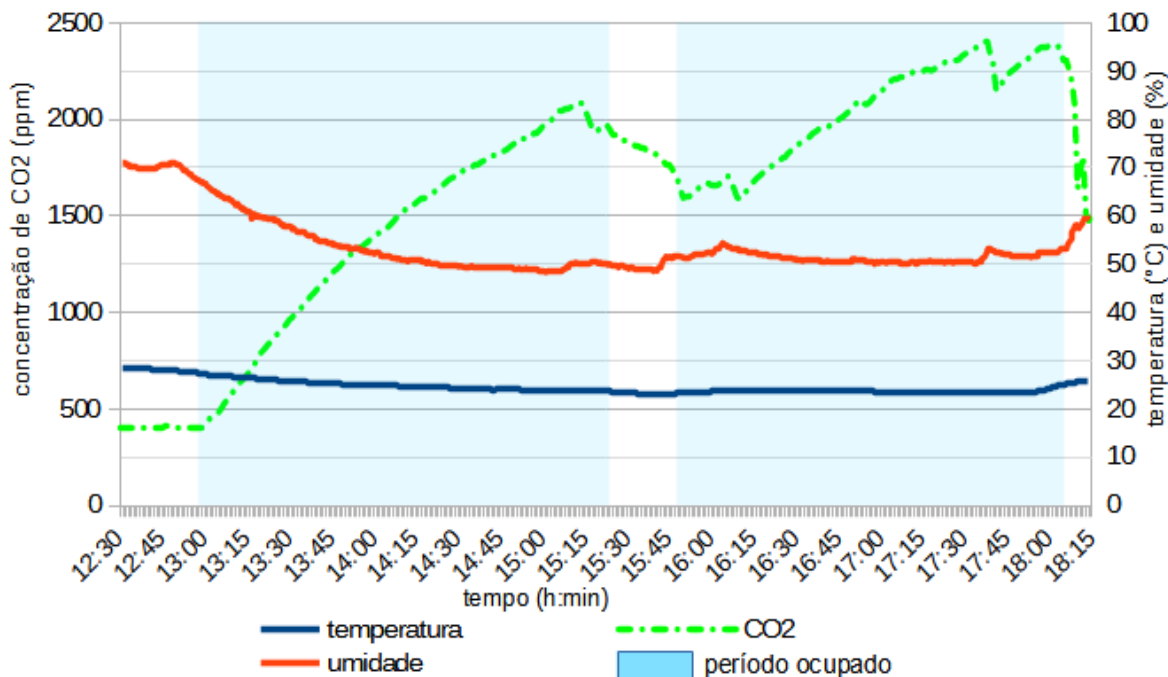
Fonte: o autor

Na sala E5, de maneira semelhante, houve ocupação da sala de aula com fechamento total de janelas e porta no início da aula, no dia 04 de novembro. A concentração inicial de CO₂ foi de 417 ppm, às 13h00. O primeiro pico, de 2088 ppm, foi alcançado às 15h13min, com uma taxa de crescimento de 12,56 ppm/min.

De 15h20min até 15h50min, houve intervalo com permanência da porta da sala (2,06 m²) aberta, o que resultou numa redução até 1593 ppm. Nesse intervalo, a ventilação unilateral realizada apenas pela porta não foi, portanto, suficiente para reduzir as concentrações aos valores recomendados. Retomou-se a aula às 15h51min, e o máximo valor foi 2406 ppm às 17h38min. Após esse horário, iniciou-se uma redução gradativa dos níveis de gás carbônico, devido à saída gradual dos

estudantes. Após o término, a taxa de redução foi de 80,4 ppm/min, devido à abertura total de janelas (9,12 m²) e porta (2,06 m²) feita pela equipe de limpeza. A Figura 35 representa o perfil da evolução das concentrações de dióxido de carbono, temperatura e umidade na sala E5.

Figura 35 - Variáveis com o tempo. Sala E5: janelas fechadas e ar condicionado ligado.



Fonte: o autor (2022)

É importante enfatizar também que os ocupantes da presente pesquisa usavam máscaras faciais devido o protocolo de combate a pandemia do Covid-19, o que se pode inferir que concentrações maiores de CO₂ poderiam ser encontradas neste trabalho em situações de não uso da máscara.

Mesmo com uso de ar-condicionado split, a temperatura da sala H4 esteve acima dos parâmetros estabelecidos pelas normas Re 09 (ANVISA, 2003), com mediana de 27,5 °C e máxima de 29,5 °C. Registrou-se que um dos equipamentos de climatização (são 2 no total) estava inoperante nessa data. Na E5, a temperatura máxima (27,7 °C) registrada se refere apenas ao período inicial da aula. Trinta minutos após o início, foi reduzida a menos de 26 °C e permaneceu até alcançar a mediana de 23,7 °C, em função da climatização. Nesse ambiente, a temperatura média foi de 24,23 °C e umidade média de 52,68 %.

4.2.4.2 Fechamento parcial de janelas e porta. Ar-condicionado ligado.

O fechamento parcial de janelas e porta, com uso simultâneo de ar-condicionado, foi outra configuração frequente foi adotada como consequência do protocolo de melhoria da ventilação nas salas de aula associadas ao conforto térmico definido pela instituição de ensino. As datas apresentadas são 01 de dezembro para a sala H4 e 09 de novembro para a sala E5.

Na sala E5, logo após o início da aula, a porta foi fechada e assim permaneceu até o final, exceto durante o intervalo. Por outro lado, na sala H4, as janelas ficaram abertas somente na primeira hora, e, a partir de 9h00, apenas a porta foi utilizada para ventilação. A Tabela 15 apresenta os dados referentes a dióxido de carbono, temperatura e umidade.

Tabela 15 - Dados dos ambientes H4 e E5, nos dias 01 de dezembro e 09 de novembro

Data e horário	Local	Densidade ocupacional	Abertura de janela (m ²)	Abertura de porta (m ²)	Uso de ar-condicionado
01/12/2021 8h00 às 12h00	Sala H4	4,35 m ² /p 13,64 m ³ /p	sim (variável)	1,68	sim
09/11/2021 13h00 às 18h20	Sala E5	5,38 m ² /p 18,25 m ³ /p	9,12 m ²	0	sim

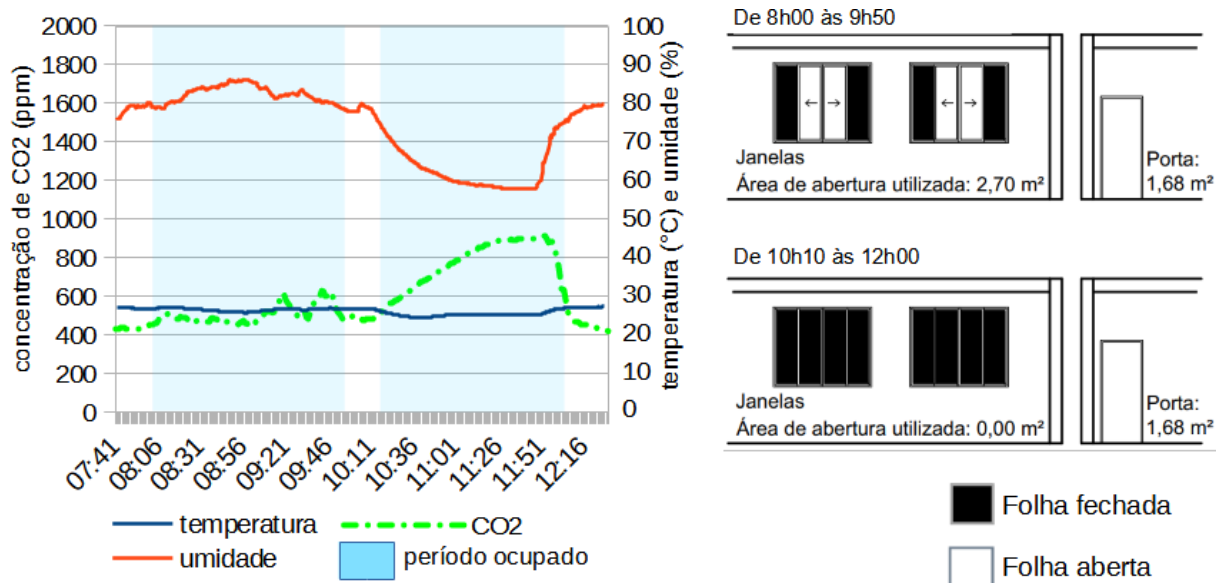
		mínima	média	máxima	mediana
Sala H4	CO₂ (ppm)	443	623,32	916	554
	Temperatura (°C)	26	27,06	27,6	27,2
	Umidade (%)	75,8	79,49	82,5	79,7
Sala E5	CO₂ (ppm)	401	473,79	574	458
	Temperatura (°C)	22,6	24,1	26,7	24
	Umidade (%)	75,9	80,4	85,1	80,5

Fonte: o autor (2022)

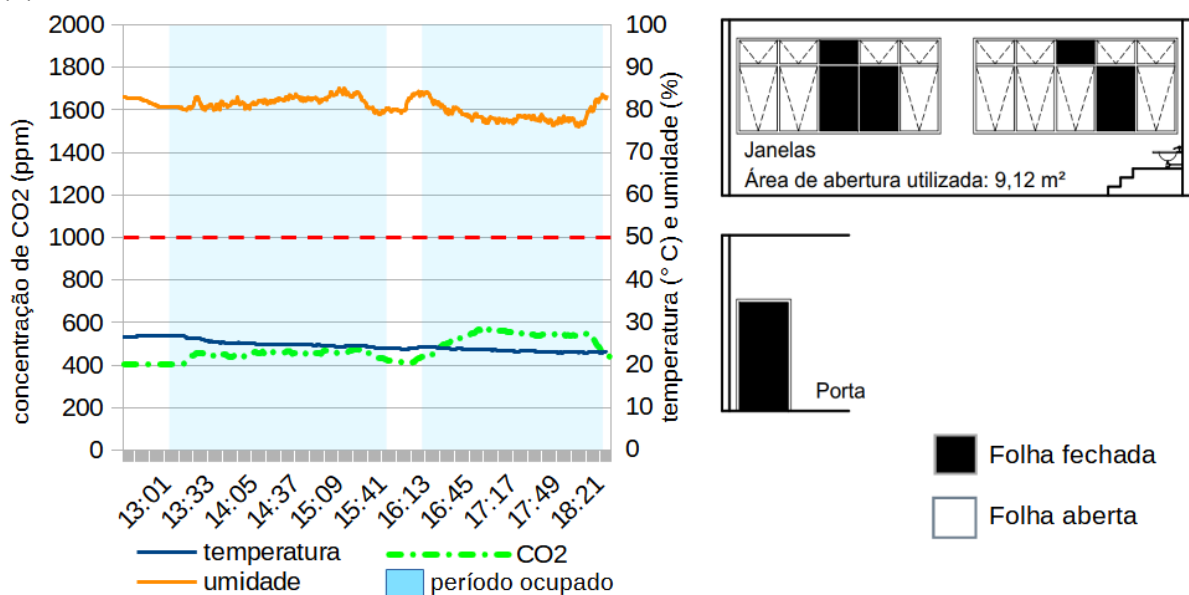
Na sala H4, enquanto janelas e porta se mantiveram abertas, os níveis de dióxido de carbono permaneceram mais ou menos estáveis (ver Figura 36). A aula foi brevemente interrompida no intervalo de 9h50 às 10h10. Após a pausa, as janelas foram fechadas e o crescimento foi retomado até atingir-se o pico de 916 ppm próximo do fim da aula. Na segunda parte da aula, a taxa de aumento foi de 4,16 ppm/min, bem abaixo das verificadas em situação de fechamento total de janelas e portas.

Figura 36 - Variação de temperatura, umidade e dióxido de carbono. Salas H4 (a) e E5 (b): janelas e/ou porta abertas e ar-condicionado ligado

(a) Sala H4



(b) Sala E5



Fonte: o autor (2022)

Na sala E5, a área de abertura de 9,12 m² foi suficiente para manter a concentração de dióxido de carbono com poucas variações, com média de 473,79 ppm e máximo de apenas 574 ppm, enquanto a estação externa registrou média de 420,75 ppm e máximo de 458 ppm, durante o horário de ocupação. De acordo com o padrão Europeu EN 13779, a diferença de até 400 ppm em relação ao ar externo se enquadra como ótima (categoria IDA1) (SCHIBUOLA; SCARPA; TAMBANI, 2016). A concentração de CO₂ é um indicador da boa renovação de ar, o que tem sido indicado

como uma das medidas de prevenção ao contágio com o vírus causador da Covid-19 (XU *et al.*, 2021).

A maior área de abertura, na sala E5, permitiu maior renovação de ar, o que manteve a concentração de dióxido de carbono mais estável. No ambiente H4, mesmo com uso de 2,70 m² de janelas em boa parte do período de ocupação, o fechamento provocou elevação dos níveis de CO₂, porém sem ultrapassagem do limite de 1000 ppm, graças à continuidade da renovação de ar pela porta. Com base nos níveis desse gás, percebe-se que a adoção de aberturas em paredes opostas (janelas + portas) se mostrou mais eficiente para as trocas de ar.

As temperaturas alcançadas demonstram a diferença de eficiência dos equipamentos de ar-condicionado entre os dois ambientes. Nesse quesito, a sala E5 permaneceu mais próxima dos limites de conforto térmico mesmo com as janelas abertas. Quanto à umidade relativa do ar, mesmo com condicionadores split em funcionamento, as médias foram bastante elevadas para as duas salas (82,5 % para H4 e 85,1% para E5). Isso ocorreu porque tanto 09 de novembro quanto 01 de dezembro foram dias chuvosos, com umidade relativa média de 91,18 % e máxima de 100% para o primeiro, e média de 88,4 % e máxima de 96,4 % para o segundo, conforme registros feitos no ambiente EXT.

4.2.4.3– Abertura de janelas e porta. Ar-condicionado desligado.

A terceira configuração verificada durante o monitoramento foi a utilização simultânea de janelas e portas, porém com o ar-condicionado desligado. Os dias apresentados a seguir são 12 de novembro para a sala H4 e 17 de novembro para a sala E5.

Na sala H4, a aula durou duas horas e vinte minutos sem intervalo. Os ocupantes estabeleceram uma pequena abertura de janela de 0,45 m², além de 1,68 m² de porta, porém de maneira constante. Na sala E5, as atividades duraram duas horas e quarenta minutos, sem interrupção, com abertura de janelas de 2,46 m². Nessa sala também a porta permaneceu aberta em todo o período de ocupação. Os dados referentes à utilização dos ambientes e das variáveis constam no Tabela 16.

Tabela 16 - Dados dos ambientes H4 e E5, nos dias 12 de novembro e 17 de novembro

Data e horário	Local	Densidade ocupacional	Abertura de janela (m ²)	Abertura de porta (m ²)	Uso de ar-condicionado
12/11/2021 8h00 às 10h20	Sala H4	3,43 m ² /p 10,72 m ³ /p	0,45	1,68	não
17/11/2021 14h00 às 16h40	Sala E5	7,16 m ² /p 24,37 m ³ /p	2,46	2,06	não

	mínima	média	máxima	mediana
CO₂ (ppm)	417	564,57	777	535
Sala H4 Temperatura (°C)	20,4	22,07	22,6	22,3
Umidade (%)	89,4	91,88	96,4	91,4
CO₂ (ppm)	411	431,55	466	439
Sala E5 Temperatura (°C)	25,4	25,73	26	25,8
Umidade (%)	82,1	83,84	85,2	84,1

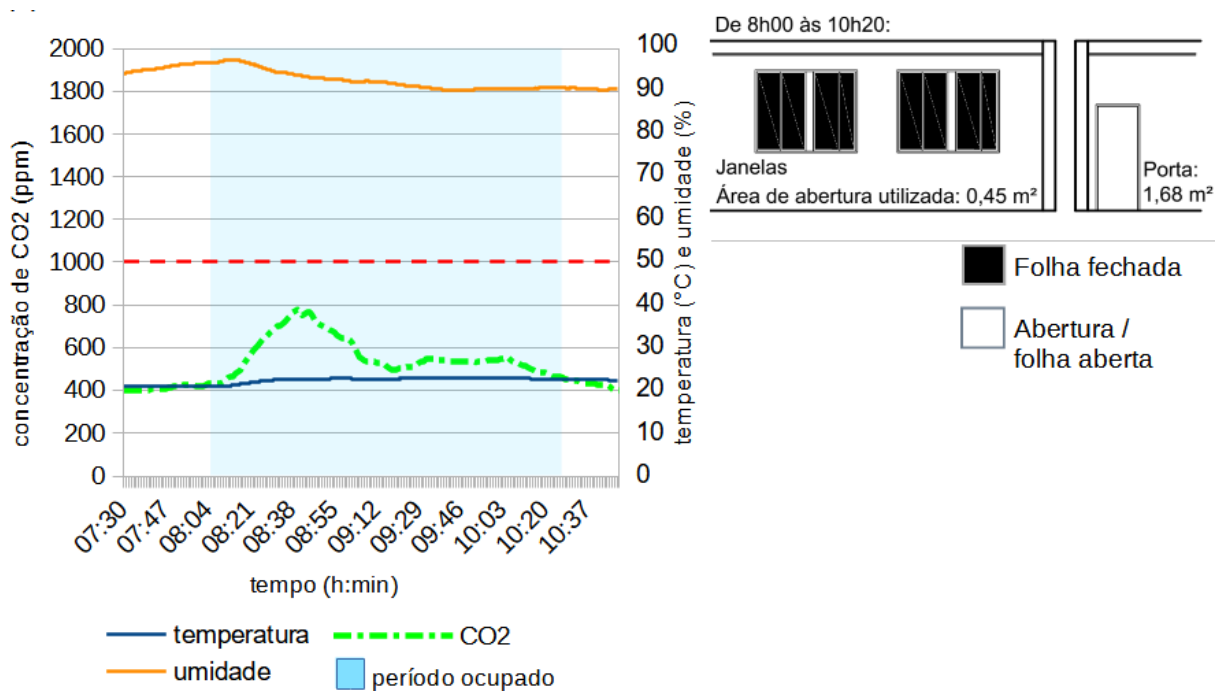
Fonte: o autor (2022)

A soma das áreas de abertura de janelas e porta resultou em 2,13 m², na sala H4. Como essas esquadrias estão em paredes opostas, possivelmente a ventilação cruzada potencializou a renovação de ar, mesmo com área reduzida. Esse resultado pode ter sido favorecido também pelo curto período da aula e pela pequena quantidade de ocupantes (14 pessoas). Ainda assim, é possível concluir que o sistema de ventilação natural, nesse ambiente e nessa data, possibilitou a renovação de ar mais eficaz. A média alcançada foi de 564,57 ppm, e o máximo valor foi de 777 ppm.

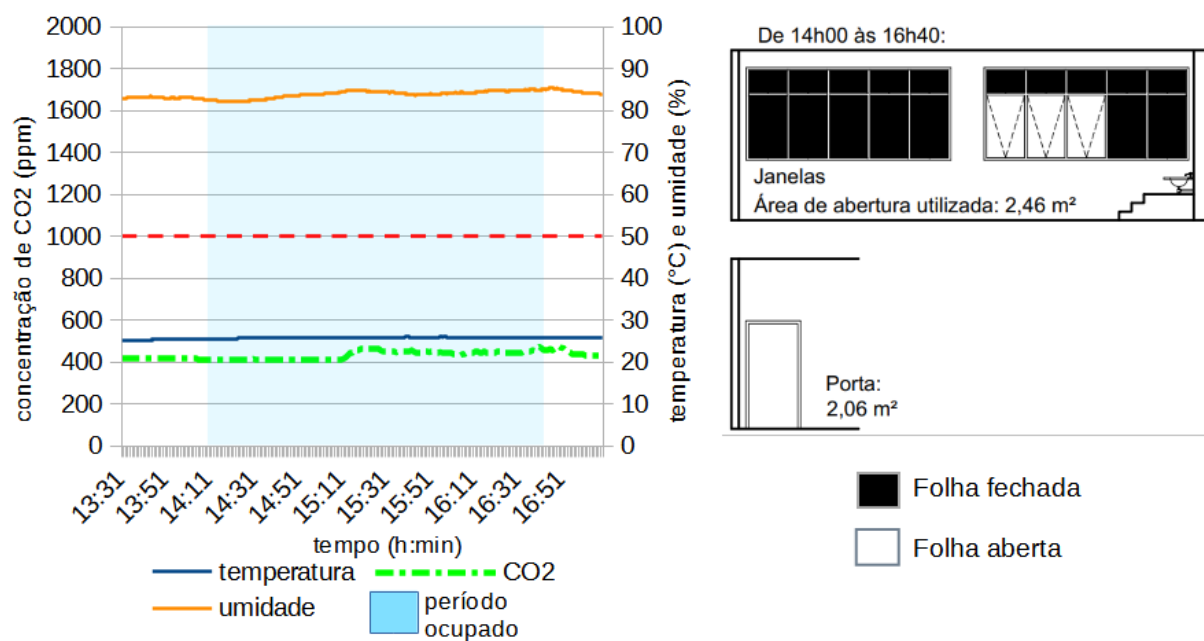
Ao longo da aula na sala H4, por utilizar-se menor área de abertura e somado à maior densidade ocupacional (3,43 m²/p e 10,72 m²/p), alcançou média e máximo de 564,57 ppm e 777 ppm, respectivamente, valores superiores aos registrados na sala E5, onde houve maior utilização de janelas e ocupação muito menor. Contudo, nos dois ambientes, os níveis de dióxido de carbono permaneceram abaixo de 1000 ppm durante todo o período ocupado. A Figura 37, a seguir, apresenta o perfil da concentração de CO₂, temperatura do ar e umidade relativa do ar ao longo do tempo, destacado o período de ocupação em azul.

Figura 37 - Variação de temperatura, umidade e dióxido de carbono. Salas H4 (a) e E5 (b): janelas e porta abertas e ar-condicionado desligado

(a) Sala H4



(b) Sala E5



Fonte: o autor (2022)

Na sala E5, a área de abertura totalizou 4,52 m² (2,46 m² de janelas + 2,06 m² de porta). A baixa densidade ocupacional (7,16 m²/p) somada à ventilação cruzada em virtude da utilização de aberturas em paredes opostas resultou numa ventilação bastante eficiente, com base na estabilidade nas concentrações de CO₂. A média desse gás foi apenas 5% maior que o valor mínimo, enquanto o máximo foi somente 10,5% superior à média.

As temperaturas tiveram pouca variação nos dois dias, com mínimo de 20,4 °C e 22,6 °C no dia 12 de novembro. A média na sala H4 foi de 22,07 °C, 15,55% maior que a média na estação EXT, que foi 19,09 °C. Já no dia 17 de novembro, o valor mínimo foi 25,4 °C e, o máximo, 26 °C. Na sala E5, o valor médio foi 25,73 °C, 4,46% maior que o valor no ambiente EXT, de 24,63 °C.

Como o dia 12 de novembro foi chuvoso, a umidade interna na sala H4 teve média de 91,88 % e máximo de 96,4%, contra média de 99,52 % e máximo de 100% no ambiente externo. Na sala E5, em 17 de novembro, a umidade média foi de 83,84 % e máximo de 85,2%, bastante inferior à média externa diária, equivalente a 87,55% e máximo igual a 100% (devido à ocorrência de chuva no turno matutino). Porém, considerando-se apenas o período vespertino, o mesmo em que houve a aula, os registros indicam média exterior de 86,24% e máximo de 94,1%.

4.3 – Comparação entre a Campanha 1 e a Campanha 2, considerando a influência da poluição externa nas salas de aula

As figuras 38 e 39, a seguir, apresentam as séries temporais das concentrações de material particulado para a primeira e a segunda campanhas, com dados expressos em médias de 1 hora, na unidade µg/m³. Os gráficos representam em azul o MP_{2,5}.

Figura 38 - Médias horárias de MP_{2,5} para o ambiente EXT, na campanha 1

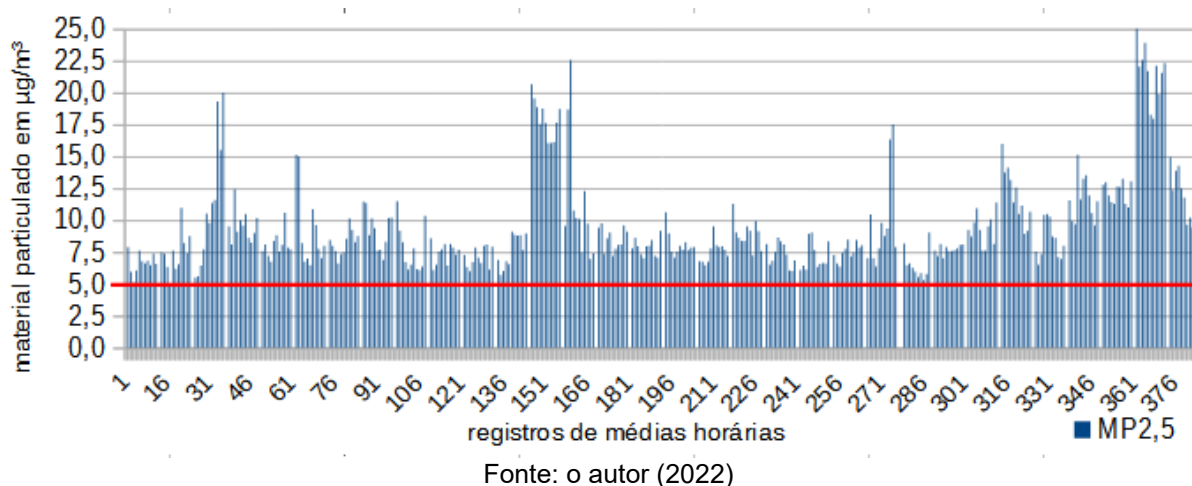
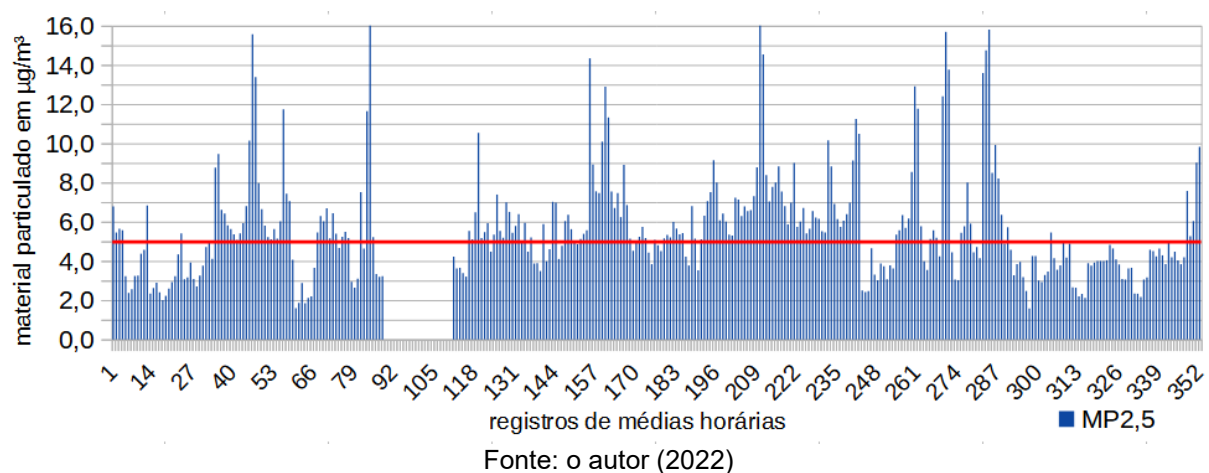


Figura 39 - Médias horárias de MP_{2,5} para o ambiente EXT, na campanha 2



A linha horizontal, em vermelho, indica o limite de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média anual de MP_{2,5}, segundo a OMS (2021). Percebe-se que todas as médias de 1 hora das concentrações externas, na campanha 1, estiveram acima das diretrizes internacionais. Já durante a campanha 2, em maioria, as médias horárias foram inferiores a este limite sendo que, porém, foram significativas as ocorrências de ultrapassagem.

Resultados semelhantes foram obtidos para a sala H4, próxima à via de tráfego, conforme figuras 40 e 41. Todas as médias horárias de MP_{2,5} foram superiores a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no primeiro período de monitoramento enquanto que poucas superaram essa marca no segundo. Isso mostra que as concentrações internas acompanharam as alterações no ar externo.

Figura 40 - Médias horárias de MP_{2,5} para a sala H4, na campanha 1

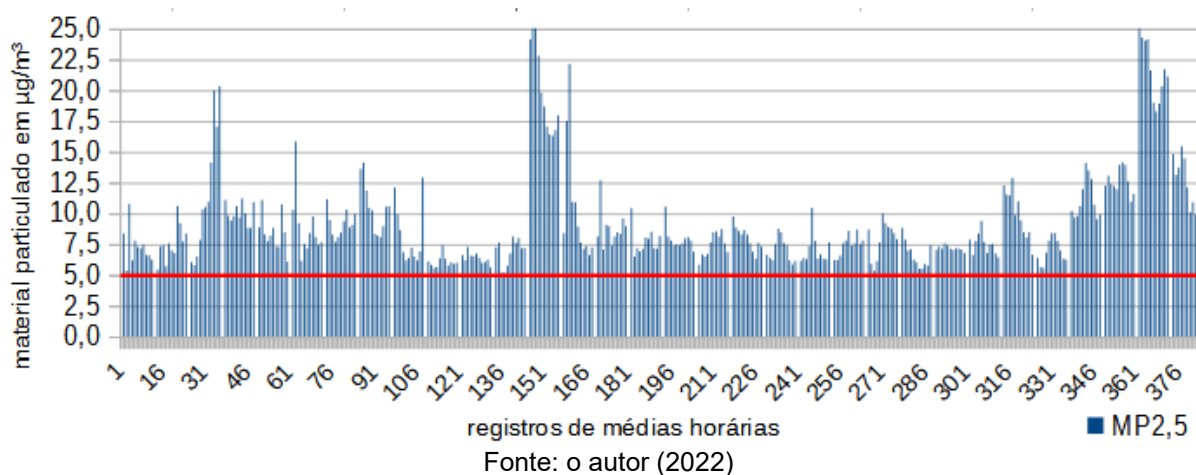
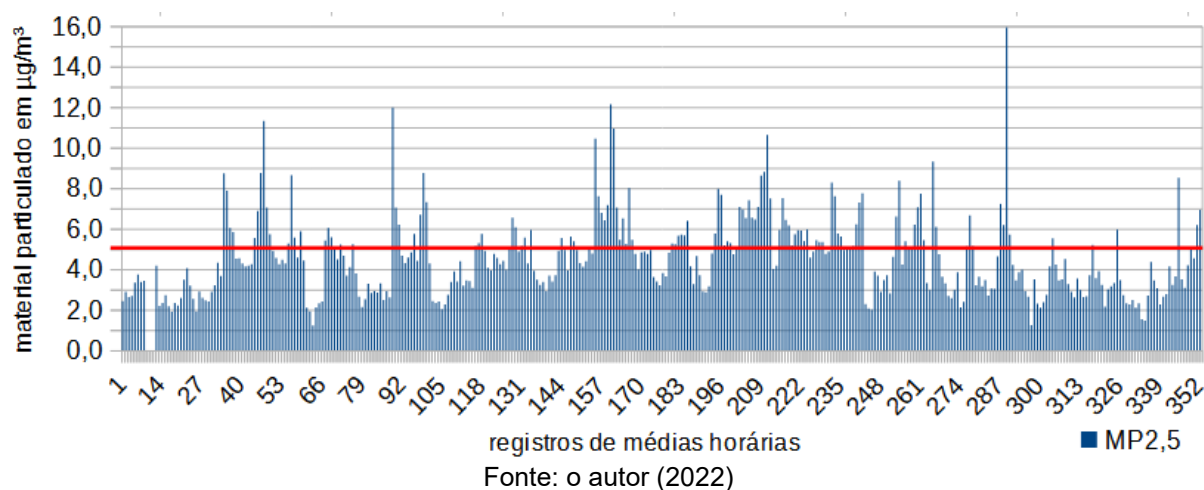
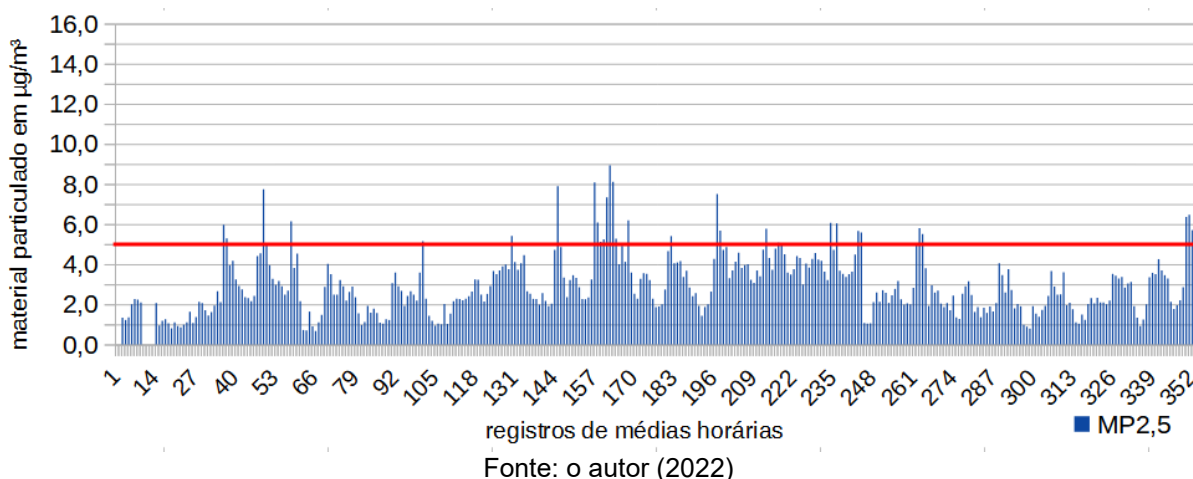


Figura 41 - Médias horárias de $\text{MP}_{2,5}$ para a sala H4, na campanha 2



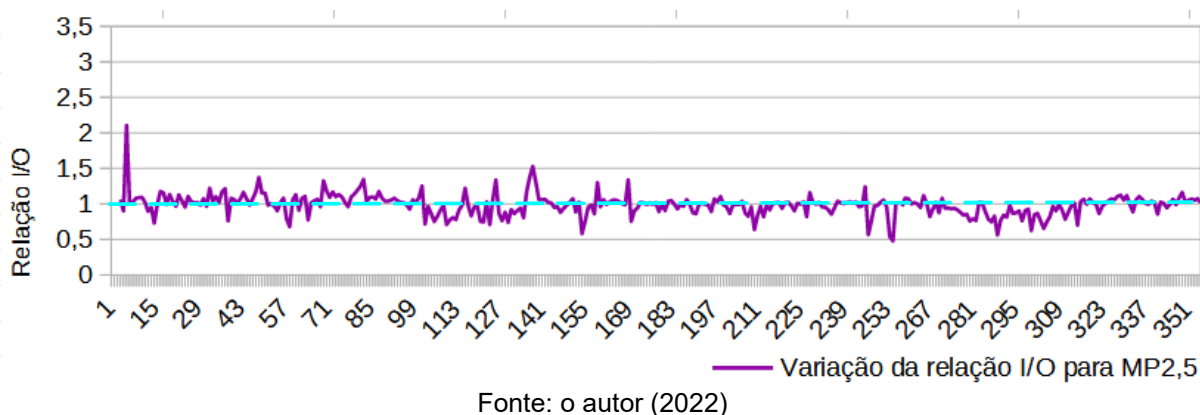
Contudo, considerando-se a campanha 2, observa-se que, entre a sala mais próxima da avenida (H4) e a mais afastada (E5) (figura 42), há uma notória redução nas concentrações médias horárias no ambiente mais distante da via pública. Na sala E5, os resultados são visivelmente em comparação às médias calculadas para a sala H4 no mesmo período, e há menos ultrapassagens dos parâmetros da OMS.

Figura 42 - Médias horárias de $\text{MP}_{2,5}$ para a sala E5, na campanha 2



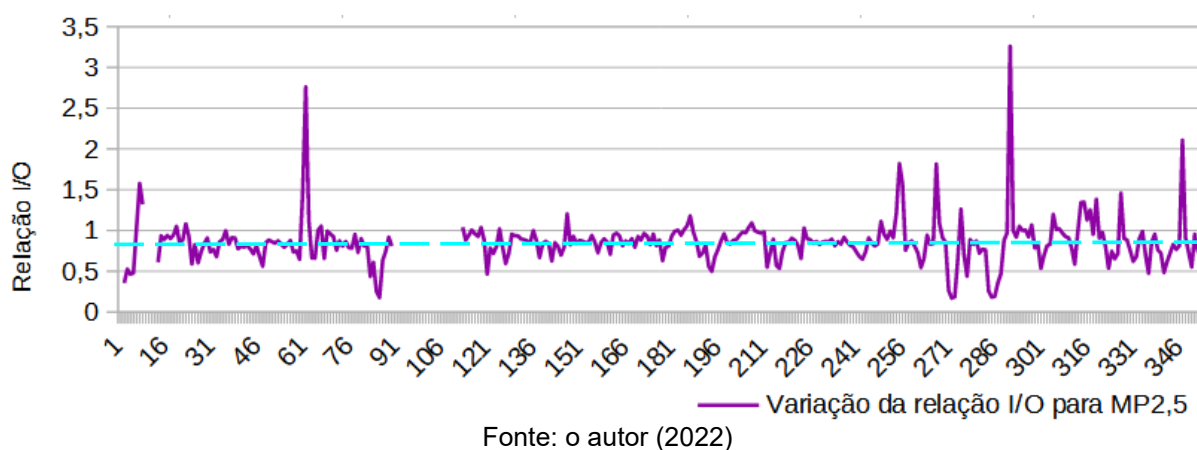
Na comparação entre as médias de 1 hora das concentrações de $\text{MP}_{2,5}$ entre a sala H4 e o ambiente EXT (figura 43), percebe-se que a relação entre os espaços interno e externo (I/O) variou entre 0,5 e 1,5, na maior parte do tempo, salvo pequenos picos. Os valores foram muito próximos de 1, indicando a proximidade dos valores entre a poluição oriunda do espaço público e a da sala de aula.

Figura 43 - Relação entre as concentrações médias de 1 hora de $\text{MP}_{2,5}$ entre os ambientes interno (*indoor*) e externo (*outdoor*), considerando a sala H4 para a campanha 1



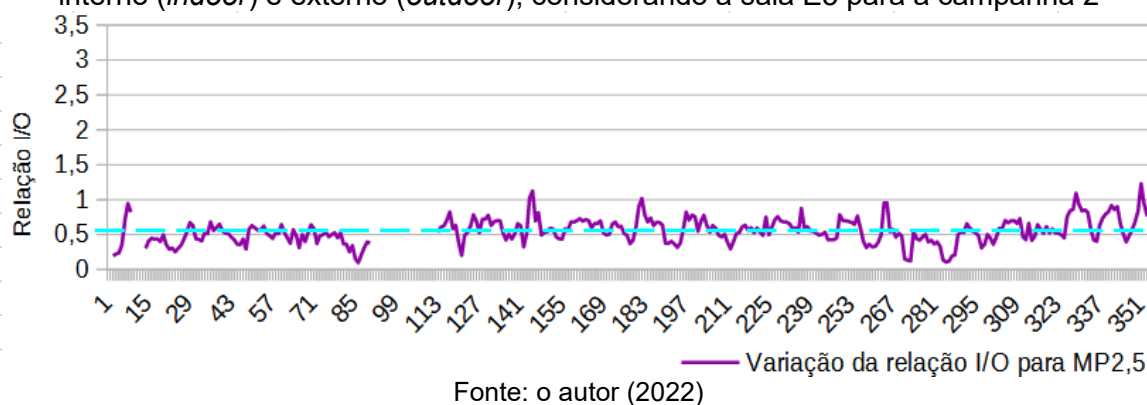
Nas figuras 44 e 45, apresentam-se as relações I/O das médias horárias de $\text{MP}_{2,5}$ entre a sala H4 e o espaço EXT, como também entre a sala E5 e o ambiente EXT considerando a segunda campanha de monitoramento.

Figura 44 - Relação entre as concentrações médias de 1 hora de $\text{MP}_{2,5}$ entre os ambientes interno (*indoor*) e externo (*outdoor*), considerando a sala H4 para a campanha 2



Para a sala H4, próxima da avenida, a comparação entre os gráficos da relação I/O entre a segunda e a primeira campanha mostra que, na maior parte do tempo, o ambiente interno foi mais impactado pelo externo no primeiro período de monitoramento. Essa observação se baseia no fato de que a relação entre as médias horárias internas e externas oscilou próxima de 1,0 (tracejado azul), enquanto que, no mesmo ambiente, no segundo período, oscila em torno de 0,8, que indica a sala de aula com concentrações médias inferiores ao exterior, apesar das oscilações apresentadas no gráfico.

Figura 45 - Relação entre as concentrações médias de 1 hora de MP_{2,5} entre os ambientes interno (*indoor*) e externo (*outdoor*), considerando a sala E5 para a campanha 2

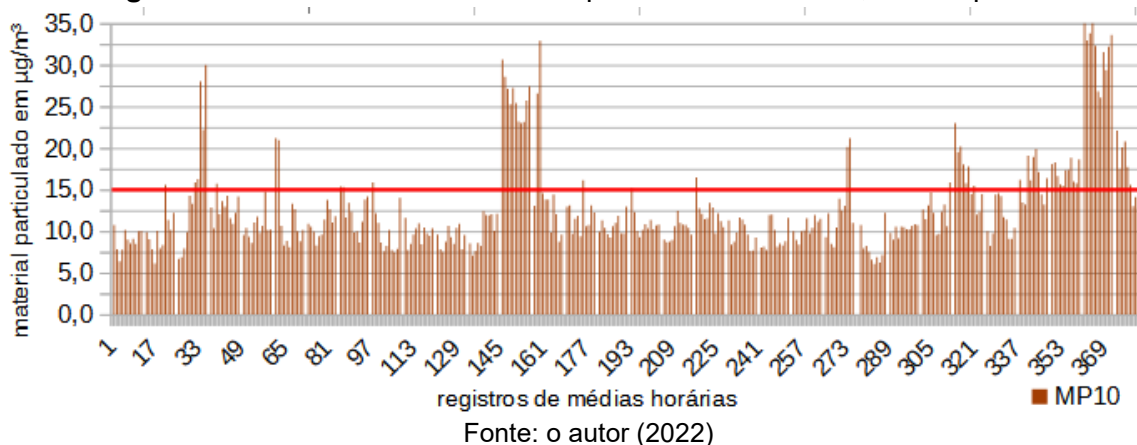


A sala E5, mais afastada da avenida, apresentou relação I/O inferior, que oscilou próximo de 0,5. Os valores calculados para este ambiente foram significativamente menores do que para a sala H4, o que indica uma menor influência da poluição externa na sala de aula mais afastada da avenida.

As figuras 46 a 50, a seguir, apresentam as séries temporais das concentrações de material particulado para a primeira e a segunda campanhas, com dados expressos em médias de 1 hora, na unidade $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Os gráficos representam,

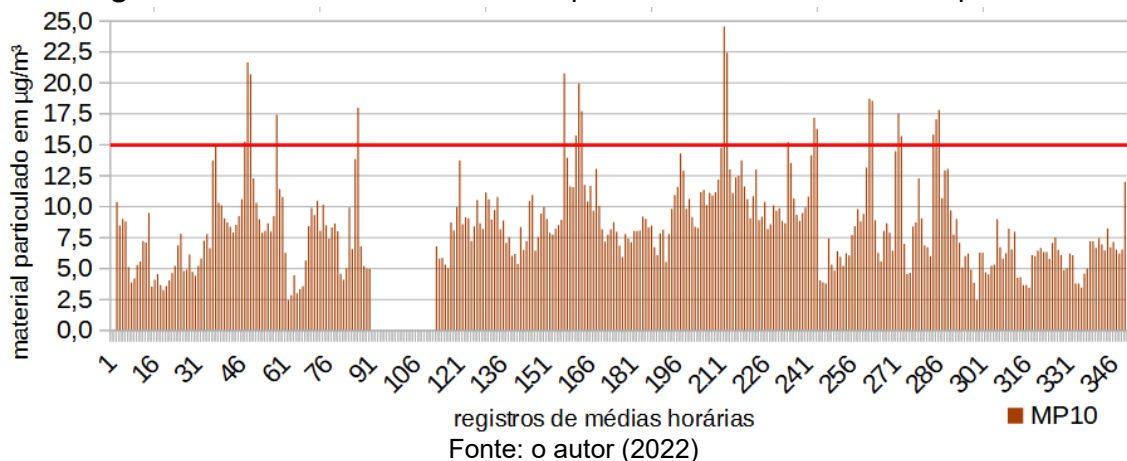
em marrom, os valores calculados para o poluente MP₁₀.

Figura 46 - Médias horárias de MP₁₀ para o ambiente EXT, na campanha 1



A partir da comparação entre as figuras 45 e 46, tem-se a superioridade das concentrações médias horárias de MP₁₀ no primeiro período monitorado. Na campanha 1, 66,57% das médias superaram 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 20,86% foram maiores que 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que é o limite para a média anual, conforme OMS. Já na campanha 2, apenas 6,38% das médias superaram 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (e 25,84% foram maiores que 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Outro dado que chama atenção é que a máxima média, no primeiro período, superou 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto que, no segundo, foi de 24,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 47 - Médias horárias de MP₁₀ para o ambiente EXT, na campanha 2



Os gráficos apresentados nas figuras 48 e 49, representam as médias horárias de MP₁₀ para a sala H4, próxima da Avenida Vitória. Observa-se que as ultrapassagens do limite de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ foram mais frequentes na campanha 1, com 17,66%, enquanto que, na campanha 2, foram apenas 2,01% acima do referencial.

Figura 48 - Médias horárias de MP₁₀ para a sala H4, na campanha 1

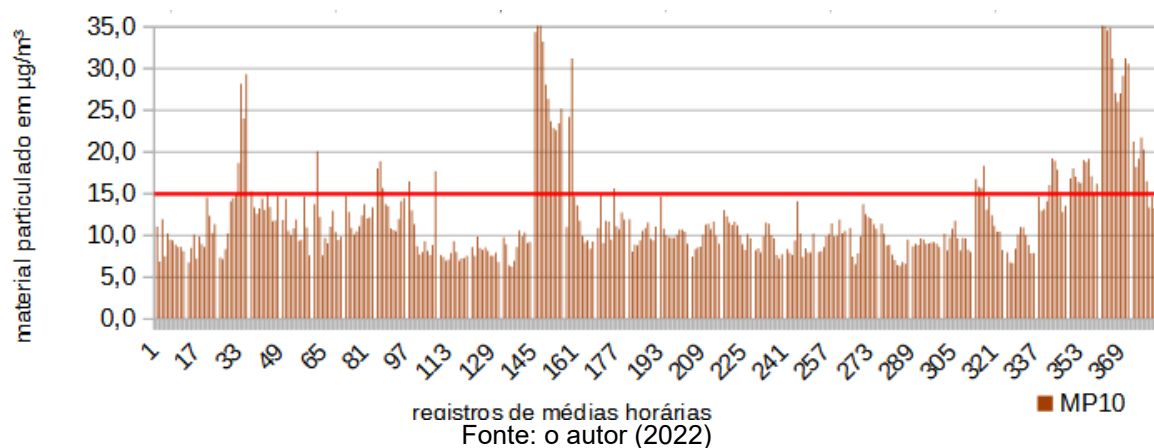
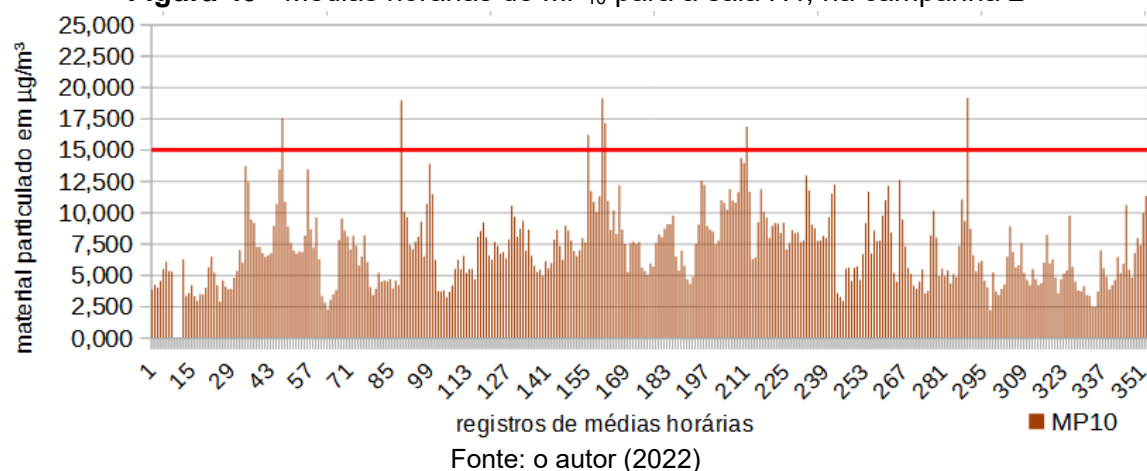
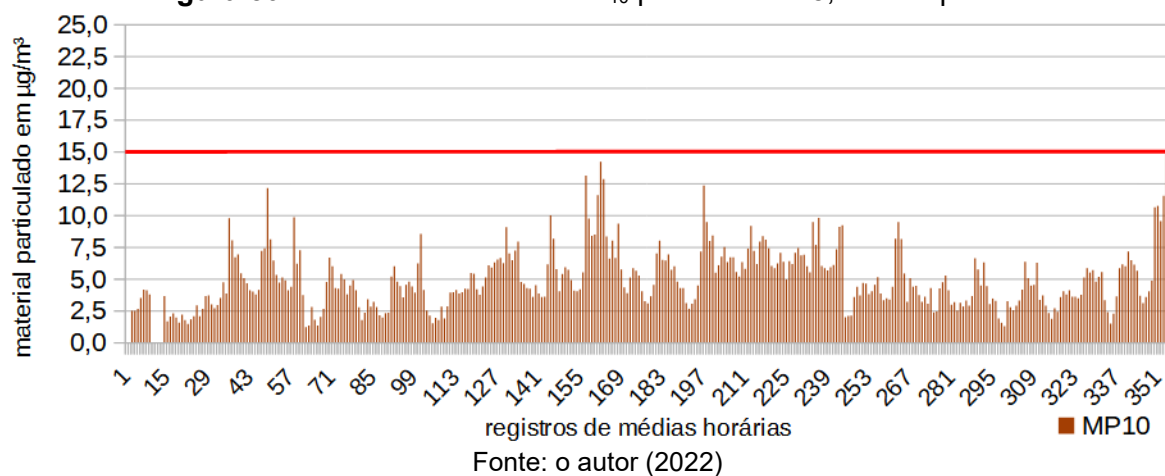


Figura 49 - Médias horárias de MP_{10} para a sala H4, na campanha 2



Entre as salas de aula, também para o MP_{10} , a sala E5, que é mais afastada da via de tráfego principal, apresentou médias horárias inferiores às dos ambientes próximos da avenida. Nesse espaço, apenas 0,29% das médias ficaram acima de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver figura 50).

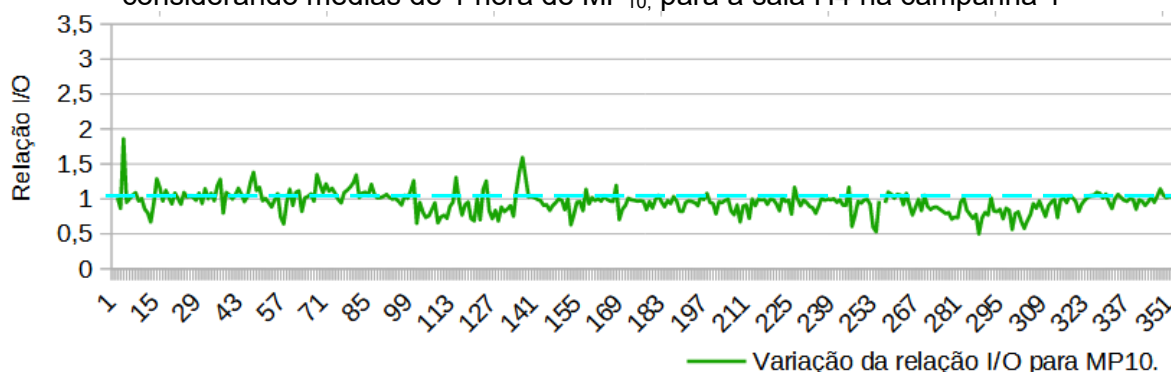
Figura 50 - Médias horárias de MP_{10} para a sala E5, na campanha 2



Os gráficos das figuras 51, 52 e 53 representam as relações entre as

médias horárias das concentrações dos ambientes internos divididas pelas medidas equivalentes calculadas para o ambiente externo.

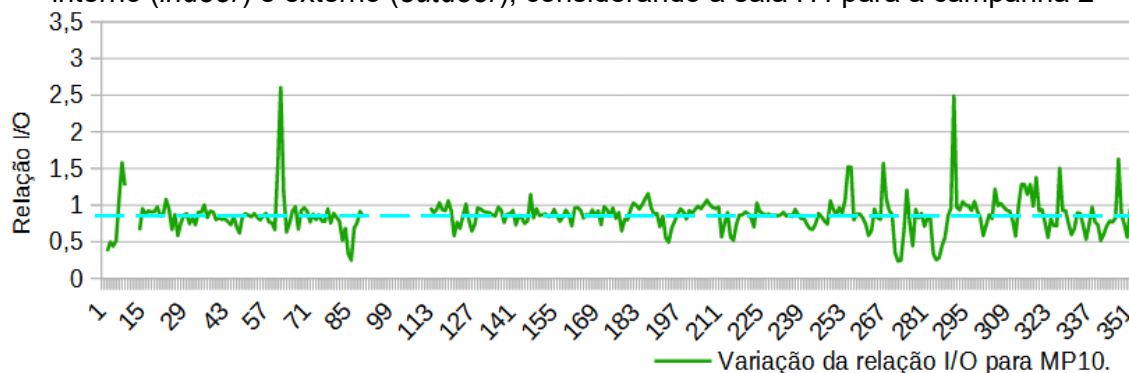
Figura 51 - Relação entre as concentrações internas (*indoor*) e externas (*outdoor*), considerando médias de 1 hora de MP₁₀, para a sala H4 na campanha 1



Fonte: o autor (2022)

De maneira semelhante ao ocorrido para o MP_{2,5}, na sala H4, a relação I/O oscilou próxima a 1,0, o que indica a relação próxima entre os níveis médios de poluição da sala de aula e do ambiente externo no primeiro período de monitoramento. Na campanha 2 (figura 52), essa relação foi ligeiramente inferior, em média 0,85, porém apresentando maiores variações, o que se observa pelos picos e depressões na curva.

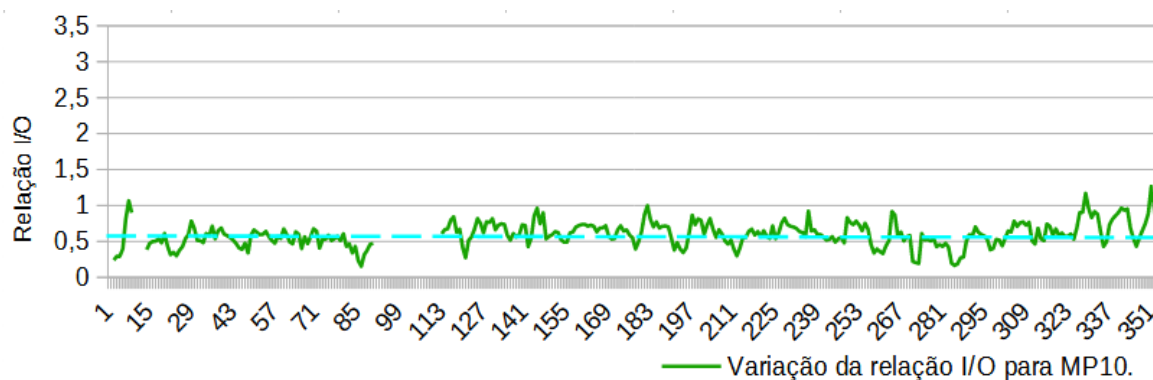
Figura 52 - Relação entre as concentrações médias de 1 hora de MP₁₀ entre os ambientes interno (*indoor*) e externo (*outdoor*), considerando a sala H4 para a campanha 2



Fonte: o autor (2022)

Na figura 53, percebe-se que, na sala E5, o afastamento desse ambiente em relação à avenida possivelmente reduziu o impacto dos poluentes oriundos do tráfego de veículos, dado a menor relação I/O calculada em comparação aos resultados obtidos para a sala H4.

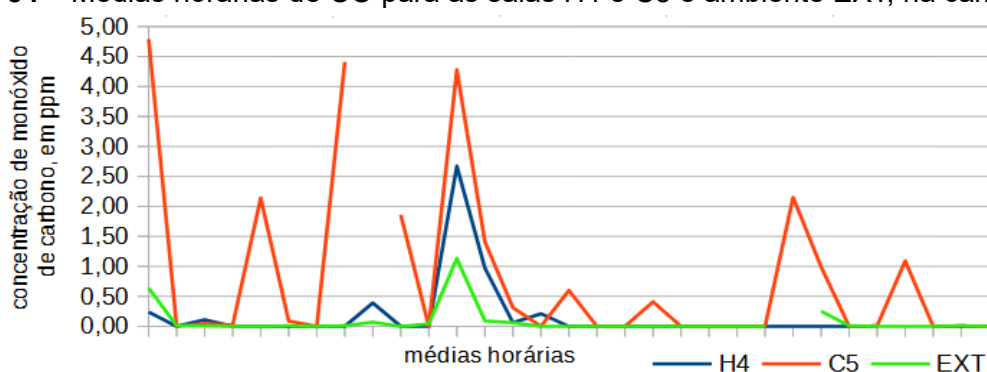
Figura 53 – Relação entre as concentrações médias de 1 hora de MP₁₀ entre os ambientes interno (*indoor*) e externo (*outdoor*), considerando a sala E5 para a campanha 2



Fonte: o autor (2022)

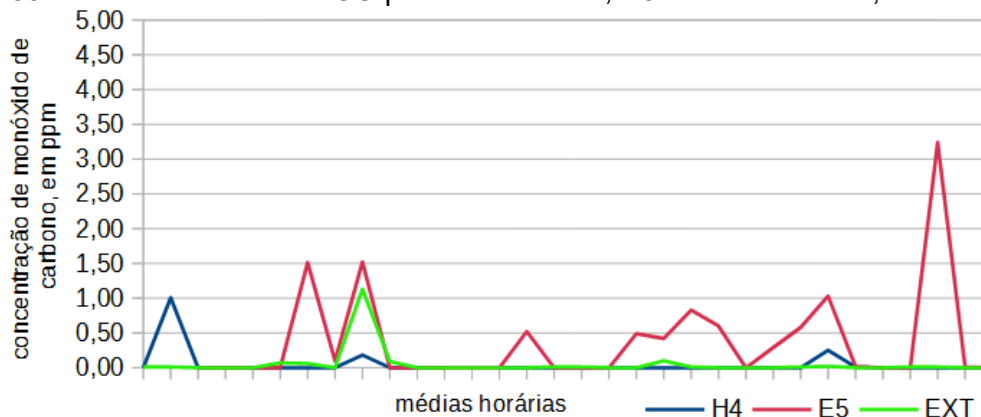
Os gráficos das figuras 54 e 55 apresentam os valores das médias horárias de monóxido de carbono (CO), nas campanhas 1 e 2, respectivamente.

Figura 54 – Médias horárias de CO para as salas H4 e C5 e ambiente EXT, na campanha 1



Fonte: o autor (2022)

Figura 55 – Médias horárias de CO para as salas H4, E5 e ambiente EXT, na campanha 2



Fonte: o autor (2022)

O limite estabelecido para média de 24 horas pela OMS é de 3,49 ppm, aproximadamente. Considerando as médias horárias calculadas, esse valor foi superado apenas, pontualmente, durante a campanha 1, e nenhuma vez na campanha 2. Nos dois casos, percebe-se que as salas mais afastadas (C5 e E5) da Avenida Vitória apresentaram valores superiores aos demais ambientes, com máxima

média de 4,8 ppm na campanha 1 (sala C5) e máxima média de 3,25 ppm na campanha 2 (sala E5).

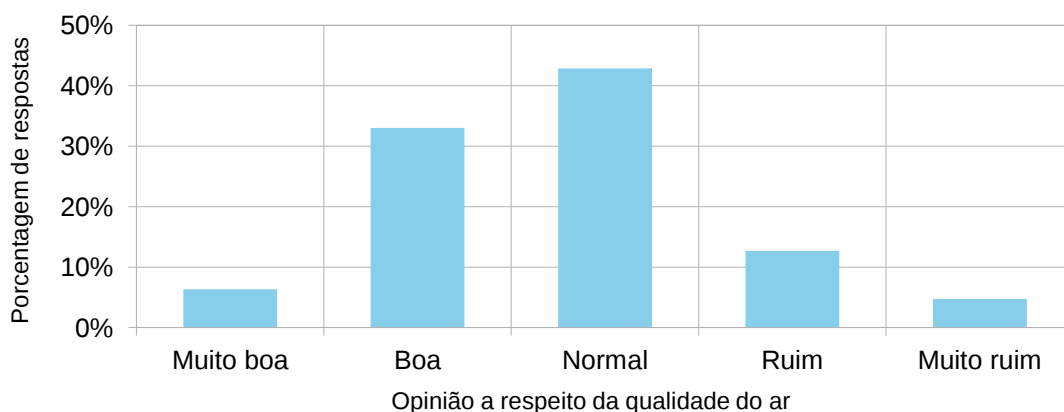
Diferentemente do ocorrido com o material particulado, que apresentou concentrações mais elevadas quando mais próximo da via de tráfego principal, para o monóxido de carbono, a distribuição se deu no sentido oposto, com as salas C5 e E5 apresentando maiores concentrações e, os ambientes próximos da avenida, menores níveis desse poluente. Percebe-se que nem sempre as elevações apresentadas nas salas C5 e E5 foram acompanhadas por aumentos nos demais ambientes.

Percebe-se ainda que, no período chuvoso, em que se deu a campanha 2, houve reduções também nos níveis de monóxido de carbono, repetindo-se a tendência observada no monitoramento de material particulado. Pode ser que a maior umidade relativa do ar e o elevado índice de chuvas tenha influenciado para menor os níveis do poluente.

4.4 – Percepção do usuário em relação a qualidade do ar

Aplicou-se um questionário com objetivo de identificar influência de fatores do ambiente nas avaliações dos alunos sobre a qualidade do ar no momento da resposta. Realizou-se esse momento em seis turmas distintas, como também em seis dias e horários diferentes, que incluíram os turnos matutino e vespertino. Durante a campanha 2, foram convidados estudantes das duas salas analisadas (H4 e E5) a participar da pesquisa resultando num total de 69 respondentes. Cada pessoa respondeu apenas uma vez (ver figura 56). Todos receberam instruções prévias sobre a pesquisa e o preenchimento.

Figura 56 - Caracterização da QAI de acordo com a opinião dos ocupantes



Em relação a impressão da qualidade do ar nas salas de aula, a maioria dos alunos avaliou a qualidade do ar como normal (42,86%), seguido por 33,33% que avaliaram como boa, 12,70% como ruim, 6,35% como muito boa e 4,76% como muito ruim. A Tabela 17 apresenta o resumo das respostas obtidas.

Tabela 17 - Análise descritiva das respostas do questionário

		<i>n</i>	Percentual
Sexo	Feminino	43	62,32%
	Masculino	25	36,23%
	Prefiro não responder	01	1,45%
Turno	Matutino	41	59,42%
	Vespertino	28	40,58%
Sala	E5	41	59,42%
	H9	28	40,58%
Neste momento, na sala de aula, você se sente	Com muito calor	8	11,60%
	Com calor	11	15,94%
	Com pouco calor	10	14,49%
	Neutro	36	52,17%
	Com pouco frio	3	4,35%
	Com frio	1	1,45%
Neste momento, você prefere que a temperatura da sala esteja:	Do jeito que está	23	36,51%
	Mais fresca	39	61,90%
	Mais quente	1	1,59%
Você sente que a temperatura da sala está confortável?	Sim	43	70,49%
	Não	18	29,51%
Neste momento, você está vestindo uma blusa de frio ou jaqueta?	Sim	3	4,84%
	Não	59	95,16%
Neste momento, você se sente cansado (a)?	Com muito sono e cansaço	9	14,28%
	Com pouco sono e cansaço	33	52,38%
	Sem sono e cansaço	21	33,33%
Como você descreveria o movimento do ar na sua sala?	Leve	29	46,03%
	Movimentado	7	11,11%
	Parado	27	42,86%

Neste momento, você sente que a qualidade do ar na sala de aula está aceitável?	Sim	47	74,60%
	Não	16	25,40%
Neste momento, como você caracterizaria a qualidade do ar da sala?	Muito boa	4	6,35%
	Boa	20	33,33%
	Normal	27	42,86%
	Ruim	8	12,70%
	Muito ruim	3	4,76%

Fonte: o autor (2022)

Com o objetivo de encontrar evidências de associação das variáveis que poderiam apresentar influência nas avaliações dos alunos, realizou-se o teste de independência de qui-quadrado. Como resultados, os dados registrados não forneceram evidências de associação entre a avaliação dos alunos sobre a qualidade do ar e o sexo dos mesmos.

Todavia, verificou-se associação significativa entre a avaliação da qualidade do ar realizada pelos estudantes e sua percepção sobre a temperatura da sala de aula. O *p-valor* obtido no teste qui-quadrado foi igual a 0,04 ($<0,05$), havendo, portanto, evidências de que a percepção da qualidade do ar esteve relacionada à opinião sobre o conforto térmico.

Para a questão “neste momento, você sente que a qualidade do ar está aceitável?”, os ocupantes tiveram duas possibilidades de resposta: sim e não, com 74,6% das respostas para a primeira opção. Ao verificar-se a associação dessas respostas com a avaliação dos alunos sobre a qualidade do ar, o *p-valor* obtido no teste foi menor que 0,0001, indicando forte associação. Esse resultado indica coerência dos usuários quanto a suas respostas. As demais covariáveis presentes no questionário não se mostraram significantes no teste.

4.4.1 Concentração de poluentes momentâneos e a percepção dos usuários

Os resultados do modelo de regressão ordinal, com uso das médias de 1 hora dos poluentes e dados de temperatura e umidade no momento da realização dos questionários são apresentados na Tabela 18, a seguir.

Tabela 18 - Resultados do modelo

Parâmetro	Estimativa (η_i)	Exp (η_i)
MP _{2,5} (média de 1h)	0,7081	2,0301
MP ₁₀ (média de 1h)	-0,3627	0,6957
CO ₂ (média de 1h)	0,0005	1,0005

Masculino	0,8487	2,33679
H4	-1,5172	0,2193
Você sente que a qualidade do ar está aceitável? (Sim)	3,3082	27,3367
Como se sente na sala (Frio)	0,7398	2,0956
Como se sente na sala (Neutro)	0,4954	1,6411
Está vestindo uma blusa de frio ou jaqueta (Sim)	0,70379	2,0214

Fonte: o autor (2022)

Para as relações entre as concentrações de partículas respiráveis e a percepção dos ocupantes, o modelo apontou que, para cada aumento de 01 unidade na média do poluente $MP_{2,5}$, a probabilidade de avaliação da qualidade do ar na categoria i ou menor diminui. Ou ainda, a cada aumento na média, a chance de o aluno passar a avaliar na categoria maior que i é 2 vezes maior ($\exp(0,7081) = 2,0301$), ou seja, aproximadamente 2 vezes mais chance de dar uma melhor avaliação em termos de qualidade, mantendo as demais covariáveis fixas.

Isso indica que, nesse contexto (período, condições climáticas, concentrações medidas e local), o aumento de 01 unidade nas concentrações de $MP_{2,5}$ está relacionado a uma resposta numa categoria superior (melhor). Portanto, percebe-se, nesse caso, que os usuários não seriam capazes de perceber o efeito danoso desse poluente para a qualidade do ar da sala de aula.

Com relação ao MP_{10} , tem-se que o coeficiente (β_i) associado estimado é 0,362. Logo, o $\log\left(\frac{P(Y \leq i)}{P(Y > i)}\right)$ aumenta 0,362 a cada elevação de 1 unidade na média deste poluente, ou seja, $\exp(0,362) = 1,436$. Por isso, a cada aumento na média de partículas inaláveis, a chance de resposta na categoria menor que i é de 1,436 vezes, ou aproximadamente 44%, mantendo-se as demais covariáveis fixas. Esse resultado indica que os ocupantes provavelmente serão mais sensíveis ao aumento do MP_{10} , em sua percepção de piora da qualidade do ar interior.

Para a covariável dióxido de carbono, tem-se que o coeficiente (β_i) associado estimado é -0,0005. O $\log\left(\frac{P(Y \leq i)}{P(Y > i)}\right)$ diminui 0,0005 a cada aumento de 1 unidade na média de CO_2 , valor muito próximo de zero, que evidencia falta de efeito na provável resposta. Além disso, como $\exp(-0,0005) = 1,0005$, isso indica que não há evidências de que a média desse gás influencie na avaliação do ocupante sobre a qualidade do ar.

A proximidade da avenida pode ser um fator de influência na probabilidade de resposta sobre a qualidade do ar. Estudantes localizados na sala H4, que é mais

próxima da via de tráfego de veículos, tem uma chance 4,56 vezes maior de fazerem uma avaliação pior da qualidade do ar, se comparados aos situados na sala E5.

O modelo também indicou maior probabilidade de avaliação positiva da qualidade do ar em relação ao conforto térmico percebido pelos usuários. Estudantes que sentem frio e que se sentem neutros têm 2,095 e 1,64 vezes mais chance de considerarem a qualidade do ar superior, respectivamente. Isso significa que a sensação de calor tem efeito negativo sobre a avaliação dos alunos.

4.4.2 – Concentração de poluentes ao longo da campanha e a percepção dos usuários

Um segundo questionário foi aplicado, também durante a campanha 2, em seis turmas, datas e horários distintos. Cada respondente participou apenas uma vez, num total de 63 pessoas. O objetivo das perguntas era obter a avaliação da condição geral da qualidade do ar ao longo do período letivo (ao contrário do primeiro, que se referiu ao momento da aplicação).

A maioria dos estudantes, 46,77%, avaliou a qualidade do ar como normal, em geral. Avaliaram como boa 25,81% das pessoas, enquanto 17,4% como ruim, 6,45% como muito ruim e apenas 3,23% como muito boa.

Utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis nos casos em que a pergunta oferecia mais de 02 categorias de respostas e, portanto, mais de 02 grupos para comparação. Aplicou-se também o teste de Mann-Whitney para situações com apenas duas categorias. Os testes visam identificar o efeito significativo de cada variável sobre as avaliações dos estudantes, e seus resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados dos testes de Kruskal-Wallis/Mann-Whitney

		<i>n</i>	Média	Desvio Padrão	<i>p – valor</i>
Sexo	Feminino	38	2,97	0,885	0,529
	Masculino	23	3,04	0,976	
Turno	Matutino	40	3,28	0,751	0,001
	Vespertino	22	2,55	1,010	
Sala	E5	40	3,22	0,800	0,037
	H4	22	2,64	1,000	
Sofre com alguma doença?	Sim	9	3,00	0,930	0,906
	Não	53	3,02	0,930	

Você tem alguma alergia?	Sim	27	3,15	0,864	0,176
	Não	35	2,91	0,951	
Frequência que você abre ou fecha as janelas?	Algumas vezes	17	2,94	0,827	0,462
	Com frequência	4	2,75	0,500	
	Nunca	16	3,12	0,957	
	Raramente	10	3,40	0,966	
	Sempre	14	2,71	0,994	
Por quanto tempo seu desconforto térmico permanece?	Menos de 5 minutos	3	3,33	2,080	0,156
	de 6 a 15 minutos	14	3,36	0,745	
	de 16 a 30 minutos	17	3,18	0,636	
	de 31 a 60 minutos	11	2,55	1,040	
	mais de 60 minutos	16	2,75	0,856	

Fonte: o autor (2022)

De acordo com os resultados, nota-se que o teste de Mann-Whitney apontou diferença significativa quando há comparação entre grupos de alunos dos turnos matutino e vespertino, em que respondentes ao longo do horário da manhã consideraram melhor a qualidade do ar. O teste também indicou avaliação mais positiva entre os ocupantes da sala E5, em relação aos da sala H4.

Os resultados deste questionário também indicaram uma alta ocorrência de declarações de alergias (43.54% das respostas) e uma baixa ocorrência de declarações de doenças respiratórias, com apenas 14,51%.

Segundo teste estatístico, observou-se que a auto declaração de doença respiratória ou alergias não interferiu significativamente nas avaliações sobre a qualidade do ar. Da mesma forma, verificou-se que aspectos como idade, tempo de desconforto térmico e frequência de abertura da janela não alteraram de forma significativa a percepção geral da qualidade do ar nas salas de aula.

4.5 – Resultados da melhoria da ventilação frente a pandemia de COVID-19

Os resultados apresentados anteriormente apontam que o uso de janelas abertas, tanto em abertura máxima quanto parcialmente, permitiu a entrada de poluentes oriundos do ambiente externo, o que ocasionou momentos de ultrapassagens, seja no cotidiano ou em eventos específicos, como nos incêndios relatados.

Considerando-se que, no presente estudo, as concentrações dos poluentes oriundos do exterior foram reduzidas tem-se ainda os resultados que indicam concentrações médias de dióxido de carbono de 649 ppm e 519 ppm para as salas

de aula E5 e H4, respectivamente, na campanha 2. Esses valores se referem aos momentos em que, nesses ambientes, utilizaram-se arranjos de abertura contínua de portas e/ou janelas ao longo do período de aula.

Nesse sentido, as reduções de CO₂ são favoráveis à diminuição do risco de infecção pelo vírus SARS-CoV-2, conforme conclusões obtidas em estudos recentes (VASSELA *et al.* 2021; MELGAR *et al.* 2021; BIRMILI *et al.* 2021).

Diversos autores entendem e recomendam o monitoramento contínuo de CO₂ como uma medida adicional de controle da qualidade do ar, no sentido de prover a ventilação necessária em ambientes com grande ocupação, de forma a reduzir o risco de contaminação pelo ar (STABILE *et al.*, 2021; CAMMARATA; CAMMARATA, 2021; TRILLES *et al.*, 2021; BIRMILI *et al.*, 2021). Desde que considerado, o uso simultâneo de múltiplas estratégias de prevenção, como uso de máscaras, limitação da ocupação, distanciamento pessoal, entre outras, como de fato ocorreu durante o período de monitoramento com ocupação das salas de aula E5 e H4.

5 CONCLUSÕES

A Qualidade do Ar Interior é uma disciplina que estuda as condições de salubridade da atmosfera interna em ambientes ocupados, como também de sua possibilidade de permitir o bem-estar e o desempenho adequado de atividades pelos usuários de um espaço interior. Salas de aula merecem preocupação especial em virtude do longo tempo de permanência e maior densidade de ocupação, sendo ainda de frequência obrigatória para crianças e adolescentes.

Numa sala de aula, a qualidade do ar é fundamental para o ensino e aprendizagem, dado que pode impactar tanto a saúde dos ocupantes quando a eficiência do processo. Por isso a relevância da pesquisa da qualidade do ar no interior desses ambientes e da adequabilidade dos sistemas de ventilação, pois isso pode influenciar o desempenho cognitivo e a saúde dos ocupantes.

A presente pesquisa se propôs a monitorar salas de aula naturalmente ventiladas no que diz respeito às concentrações de CO₂ para analisar a eficácia dos sistemas de ventilação, no que se diz ao uso das aberturas, bem como de MP_{2,5}, MP₁₀ e CO para avaliar o impacto do ambiente urbano nos níveis desses poluentes nos interiores desses ambientes, além da temperatura do ar e umidade relativa do ar. Ademais, aplicaram-se questionários para verificar as correlações entre a percepção dos ocupantes e as variáveis verificadas.

Como limitações encontradas, é importante enfatizar o período de monitoramento durante a pandemia de Covid-19. Sabe-se que o país passou por um isolamento social obrigatório e isso impactou a metodologia da presente pesquisa. Por essa razão, o monitoramento foi estabelecido em duas etapas, pois não havia certeza do retorno às atividades escolares, que funcionaram por longo período em regime não presencial. Além disso, as investigações se recortam a esse período específico pois seguia-se protocolos especiais, diferentemente da rotina normal da instituição.

Durante a campanha 1, espaços não ocupados foram monitorados e, ao longo da campanha 2, espaços com ocupação limitada, com médias de 6,62 m²/p e 4,80 m²/p para as salas E5 e H4, respectivamente, devido a protocolos de distanciamento. Nesse último período, as atividades foram desempenhadas sob um rigoroso protocolo envolvendo múltiplos aspectos voltados para a prevenção da transmissão da doença, tais como o uso de máscaras faciais, limpeza e higienização dos espaços, aumento da ventilação natural das salas de aula.

Os resultados da campanha 1 mostraram que não houve tendência de redução entre as concentrações registradas no ponto externo monitorado (EXT) e na sala H4 quando há utilização de janelas (abertas). Isso indicou que a localização da sala é afetada de forma semelhante ao espaço aberto.

Para o material particulado, as médias gerais calculadas não superaram os limites para médias de 24 horas expressos nas diretrizes da OMS (2021). No entanto, houve ultrapassagens pontuais, que culminaram em máximos valores de 65, 65 e 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ e de 94, 70 e 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} . Além disso, no primeiro período de monitoramento, com base nas médias horárias de $\text{MP}_{2,5}$, houve ultrapassagem constante do limite para a concentração média anual, que é de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tanto no ambiente externo como na sala de aula (H4).

Os níveis internos desses poluentes estiveram mais ligados aos valores externos do que as áreas de abertura de janelas, exceto para quando permaneceram fechadas, o que resultou numa redução de 9,28% e 12,63% nas médias de concentração de $\text{MP}_{2,5}$ e de MP_{10} respectivamente. O experimento em período desocupado foi vantajoso para atribuir com mais assertividade a origem da maior parte dos particulados registrados como oriundos do ambiente urbano.

Quanto ao CO, obtiveram-se médias gerais de concentração 0,04 ppm, 0,09 ppm e 0,55 ppm para os espaços EXT, H4 e C5, respectivamente. Esses valores não ultrapassaram o limite da OMS. O fato de a sala C5, mais afastada da via de tráfego principal, resultar em valores superiores indica a existência de outra fonte próxima à escola, possivelmente um restaurante.

Durante o período de ocupação (campanha 2), também não foram detectadas ultrapassagens das médias de $\text{MP}_{2,5}$, MP_{10} e CO. Além disso, as médias de particulados foram, aproximadamente, 50% mais baixas, se comparadas às encontradas na campanha 1. Esse resultado é devido, possivelmente, à influência conjunta de fatores como a deposição úmida em virtude do grande índice de chuvas no período do levantamento e da prática cotidiana de limpeza úmida de piso.

Mesmo com baixas concentrações de particulados, em todos os ambientes houve momentos de pico, que levaram a máximos de 27 e 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o $\text{MP}_{2,5}$ e 46 e 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o MP_{10} , nas salas E5 e H4, nessa ordem.

Ao se confrontar a distribuição das concentrações com as configurações de aberturas, é visível que os maiores registros para as concentrações de $\text{MP}_{2,5}$ e para MP_{10} ocorreram, em grande maioria, durante a configuração de abertura

simultânea de porta e janelas nas duas salas pesquisadas. Também identificou-se que, na maior parte do tempo, o arranjo de fechamento total das salas refletiu em menores níveis de particulados. Chamaram a atenção, também, picos de particulados, sobretudo na sala H4, que foram superiores se comparados aos da sala E5, o que sugere um impacto maior no ambiente mais próximo da via de tráfego veicular. Esse fato indica a impacto da poluição externa na piora da qualidade do ar interno, para esse tipo de poluente.

Como o monitoramento se realizou durante o período da pandemia, muitas atividades de trabalho e ensino ainda se realizavam de maneira remota. Ou seja, por esse motivo, as atividades urbanas, seja de comércio, serviço, de transporte ou de tráfego não se encontravam em pleno funcionamento. Por isso, possivelmente os resultados das concentrações seriam diferentes num contexto de normalização das atividades e de normalização do trânsito de veículos.

Porém, mesmo com concentrações médias de particulados abaixo do geralmente encontrado na literatura, a análise de regressão linear revelou impacto positivo da poluição externa tanto para o $MP_{2,5}$ quanto para o MP_{10} . Constatou-se ainda que a abertura de janelas tendeu a influenciar a quantidade de partículas respiráveis assim como as inaláveis.

Em relação ao dióxido de carbono e consequentemente a renovação do ar no ambiente, a abertura simultânea de porta e janelas foi o arranjo que proporcionou níveis mais baixos de concentração de gás carbônico tanto na sala E5 como na H4, com médias de 456 ppm e 442 ppm, respectivamente. No sentido oposto, pode-se concluir que o fechamento de janelas e portas, que foi realizado com o uso de equipamentos de ar-condicionado split, permitiu o acúmulo de CO_2 , registrando nessa situação uma concentração média que ultrapassou o limite normativo de 1000 ppm na sala E5. Além disso, nesse caso, as concentrações máximas foram múltiplas vezes superiores ao referencial, chegando a 2406 ppm na sala E5.

Essa configuração, que visa prioritariamente o conforto térmico, se mostrou inadequada para manter a qualidade do ar nas salas de aula, mesmo a baixas densidades de ocupação e com aberturas ocasionais durante os intervalos de aula. Esses resultados apontam que esse comportamento adaptativo afetou de maneira negativa a qualidade do ar interior, representado pelos altos valores de CO_2 .

A concentração de gás carbônico é considerada, por muitos autores, um indicador da eficiência da renovação de ar, bem como da qualidade do ar interior, pois

em ambientes internos pode haver fontes não somente de CO₂ produzido pelos usuários, como também da eliminação de compostos orgânicos voláteis em função dos revestimentos de materiais construtivos, mobiliários e do uso de produtos de limpeza, além de poluentes de origem física e microbiológica.

Encontraram-se correlações mais significativas entre o efeito positivo da ocupação no aumento dos níveis de CO₂ na sala H4, que foi o ambiente com maior densidade ocupacional. Revelou-se que a abertura de porta ou janela é capaz de reduzir o aumento de concentração causado pelos ocupantes e que, considerando-se exclusivamente a porta, a redução é mais acentuada na sala H4.

A partir da observação de dias específicos, representativos de cada configuração de abertura, conclui-se que a permanência de porta e/ou janelas abertas se mostraram eficazes para a ventilação, traduzida pela manutenção dos níveis controlados de CO₂. O uso contínuo de maiores superfícies de janela para ventilação permitiu o alcance de concentrações médias e máximas reduzidas. A utilização de aberturas em paredes opostas favoreceu maiores taxas de redução das concentrações do gás após os períodos de ocupação.

Apesar de o resultado desse trabalho corroborar com a eficiência do monitoramento do gás carbônico como indicador da qualidade do ar, chama-se a atenção, em contraponto, para os resultados encontrados na primeira campanha, na qual os ambientes localizados próximos a vias de alto tráfego, nessa zona urbana, são impactados negativamente pela infiltração de contaminantes externos.

Quanto aos resultados sobre a percepção da qualidade do ar pelos usuários, tem-se que 39,68% consideraram a qualidade do ar muito boa ou boa, enquanto 42,86% julgaram que estava normal. Apenas 17,46% responderam que era ruim ou muito ruim. Pela análise estatística, com base nas respostas dadas, pode-se concluir que a percepção da qualidade do ar esteve significativamente relacionada ao conforto térmico.

Pelo modelo preditivo, conclui-se que o aumento de MP_{2,5} não influenciaria a avaliação dos usuários para pior. Isso pode sugerir que os ocupantes não seriam capazes de perceber a piora da qualidade do ar por esse poluente. Com relação ao MP₁₀, a probabilidade de piora na opinião dos respondentes é 44% maior para cada aumento de 1 unidade na média desse poluente. Resultado que sugere a maior percepção das pessoas à variação de MP₁₀ em comparação a percepção com a variação de MP_{2,5}. Concluiu-se que, no geral, não há evidências que o aumento da

média da covariável dióxido de carbono tenha efeito na provável resposta dos ocupantes.

Conclui-se que, levando-se em consideração as baixas concentrações médias de material particulado registradas na campanha 2, que os arranjos que mantiveram janelas e/ou portas continuamente abertas foram eficazes para a renovação de ar das salas de aula E5 e H4, uma vez que resultaram em concentrações médias de CO₂ de 649 ppm e 519 ppm para esses ambientes, respectivamente. Conclui-se, ainda, com base na literatura existente, que esses resultados estão de acordo com os níveis de dióxido de carbono considerados representativos de uma ventilação e renovação de ar adequada como medida complementar para a redução do risco de transmissão da COVID-19.

Destaca-se que a comparação com outros estudos, em alguns casos, foi dificultada pelas opções metodológicas dos autores. Por exemplo, pesquisas que não fazem menção à densidade ocupacional, que informam apenas o número de ocupantes ou a área total da escola, em vez de utilizarem a área interna da sala de aula como parâmetro. Há ainda estudos que informam de maneira imprecisa as condições de ventilação e/ou não registram sua variação ao longo do período ocupado.

Como recomendações para o uso e ocupação desses espaços, prevenindo situações pandêmicas e não pandêmicas, e visando a construção de espaços de ensino mais saudáveis sugere-se: a) a utilização, em salas de aula, de equipamentos para monitoramento contínuo de CO₂ e de material particulado, de forma a permitir a mensuração da qualidade do ar e auxiliar tanto no controle momentâneo das configurações de ventilação como o acompanhamento prolongado, o que permitirá a definição de protocolos às diferentes situações possíveis; b) no contexto de pandemia de doenças transmitidas pelo ar, a adoção de múltiplos e simultâneos métodos visando prevenir a contaminação, como o distanciamento pessoal, a limitação da ocupação em ambientes internos, a manutenção contínua da ventilação e renovação de ar, como também o uso de máscaras, para diminuir a possibilidade de acúmulo de grandes concentrações e a permanência, no ar interior, de partículas contaminadas por patógenos; c) recomenda-se o planejamento de protocolos distintos para o cotidiano que permitam flexibilidade de soluções de ventilação, de forma a adequar a qualidade do ar interior, seja em momentos de poluição, de busca por conforto térmico, de incômodo por fatores externos ou mesmo de pandemia, mantendo-se a renovação

de ar adequada, com base nos níveis de CO₂ e demais leituras de poluentes, de maneira contínua.

Essa medida visa contribuir para o planejamento de soluções de melhoria para a infraestrutura dos ambientes, de maneira que permita o uso de sistemas de climatização sem comprometimento da renovação de ar e, por conseguinte, das condições ideais para o processo de ensino e aprendizado.

Como recomendações para trabalhos futuros coloca-se: a) o monitoramento de salas de aula em contexto não pandêmico, para comparação dos resultados; b) a identificação química do material particulado, para fins de reconhecimento de fontes; c) a associação entre a concentração de poluentes em salas de aula com o desempenho de estudantes.

REFERÊNCIAS

AAP – American Academy of Pediatrics. **COVID-19 Guidance for Safe Schools**, 25 mar. 2021. Disponível em: <https://services.aap.org/en/pages/2019-novel-coronavirus-covid-19-infections/clinical-guidance/covid-19-planning-considerations-return-to-in-person-education-in-schools/>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ABAJO, F. Javier G. *et al.* Back to Normal: An old Physics Rout to Reduce SARS-CoV-2 Transmission in Indoor Spaces. **ACS Nano**, v. 14, n. 7, p. 7704-7713, 18 jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04596>. Acesso em: 09 nov. 2021.

ABDEL-SALAM, Mahmoud M. M.. Investigation of indoor air quality at urban schools in Qatar. **Indoor and Built Environment**, v. 28, p. 278-288, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X17700948>. Acesso em: 20 jan. 2021.

ABDALLAH, Amr S. H. Thermal Monitoring and Evaluation of Indoor CO₂ Concentration in Classrooms of Two Primary Governmental Schools in New Assiut City, Egypt. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 1093-1099, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.176>. Acesso: 10 nov. 2021.

AKANMU, Williams P.; NUNAYON, Sunday S.; EBOSON, Uche C.. Indoor environmental quality (IEQ) assessment of Nigerian university libraries: A pilot study. **Energy and Built Environment**, 2020. ISSN 2666-1233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.07.004>. Acesso em: 28 set. 2020.

ALLEN, Joseph G.; IBRAHIM, Andrew M. Indoor Air Changes and Potential Implications for SARS-Cov-2 Transmission. **JAMA**, v. 325, p. 2112-2113, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.2021.5053>. Acesso em: 18 nov. 2021.

ALMEIDA, Ricardo M. S. F. *et al.*. Natural ventilation and indoor air quality in educacional buildings: experimental assessment and improvement strategies. **Energy Efficiency**, v. 10, p. 839-854, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9485-0>. Acesso em: 13 nov. 2020.

ALONSO, Alicia *et al.* Effects of the COVID-19 Pandemic on Indoor Air Quality and Thermal Comfort of Primary Schools in Winter in a Mediterranean Climate. **Sustainability**, v. 13, 2699, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052699>. Acesso em: 03 nov. 2021.

ALVES, Célia A. *et al.* Indoor/Outdoor Relationships between PM₁₀ and Associated Organic Compounds in a Primary School. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 14, p. 86-98, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.04.0114>. Acesso em: 25 abr. 2022.

AMARAL, Manuel A. P. da Silva. **Sistemas de Ventilação Natural e Mistos em Edifícios de Habitação**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11015/2/Texto%20integral.pdf>. Acesso em: 14 set. 2021.

ANDERSON, H. R. Air pollution and mortality: A history. **Atmospheric Environment**, [s.l.], v. 43, p. 142-152, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.026>. Acesso em: 07 out. 2020.

ANDERSON, Ayana R. *et al.* Hazardous Chemical Releases Occurring in School Settings, 14 States, 2008-2013. **Journal of Environmental health**, v.80, n.4, 2017. ISSN: 0022-0892. Disponível em: <https://europepmc.org/article/MED/29456264>. Acesso em: 20 jan. 2021.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução-RE nº09**, de 16 de janeiro de 2003. Disponível em: https://www.saude.mg.gov.br/images/documentos/RES_RE_09.pdf. Acesso em: 12 fev. 2020.

ANSI-ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 62.1 – 2016: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. 2016. ISSN 1041-2336. Disponível em: <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards>. Acesso em: 10 out. 2020.

ANSI-ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 62.1 – 2013: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. 2013. ISSN 1041-2336. Disponível em: <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards>. Acesso em: 10 out. 2020.

ANSI-ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 62.1 – 2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. 2019. ISSN 1041-2336. Disponível em: <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards>. Acesso em: 29 ago. 2020.

APA – Agência Portuguesa do Ambiente. **Qualidade do Ar em Espaços Interiores – Um Guia Técnico**. Amadora: Agência Portuguesa do Ambiente, 2009. Disponível em: https://apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Guias%20e%20Manuais/manual%20QArInt_standard.pdf. Acesso em: 23 ago. 2019.

As piores ruas e avenidas nos horários de pico na Grande Vitória. **A Gazeta**, Vitória, 01 set. 2019. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/es/gv/as-piores-ruas-e-avenidas-nos-horarios-de-pico-na-grande-vitoria-0919>. Acesso em: 10 dez. 2020.

ASANATI, Kaveh; VODEN, Louise; MAJEED, Azeem. Healthier schools during the COVID-19 pandemic: ventilation, testing and vaccination. **Journal of the Royal Society of Medicine**, v. 114, p. 160-163, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/0141076821992449>. Acesso em: 10 nov. 2021.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **One Page Guidance for Reopening Schools**. 2021. Disponível em: <https://www.ashrae.org/technical-resources/reopening-of-schools-and-universities>. Acesso em: 08 fev. 2021.

ASIF, Ayesha; ZEESHAN, Muhammad; JAHANZAIB, Muhammad. Indoor temperature, relative humidity and CO2 levels assessment in academic buildings with different heating, ventilation and air-conditioning systems. **Building and Environment**, v.133, p.83-90, 2018. ISSN 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.042>. Acesso em: 29 nov. 2020.

AZUMA, Kenichi *et al.* Environmental factors involved in SARS-CoV-2 transmission: effect and role of indoor environmental quality in the strategy for COVID-19 infection control. **Environmental Health and Preventive Medicine**, v. 25, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12199-020-00904-2>. Acesso em: 14 jan. 2022.

BAIRD, Colin; CANN, Michael. **Química Ambiental**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. ISBN 978-85-7780-851-9

BECERRA, Jose A. *et al.* Identification of potential indoor air pollutants in schools. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118420>. Acesso em: 10 dez. 2021.

BENSOUSSAN, Marcos D.. **Qualidade Ambiental Interna em Edificações**. 1ª ed. Brasília: Unyleya, 2017.

BIRMILI, Wolfram *et al.* Lüftungskonzepte in Schulen zur Prävention einer Übertragung hochinfektiöser Viren (SARSCoV-2) über Aerosole in der Raumluft. **Bundesgesundheitsbl**, v.64, p. 1570-1580, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00103-021-03452-4>. Acesso em: 23 nov. 2021.

BOGDANOVICA, Snezana; ZEMITIS, Jurgis; BOGDANOVICS, Raimonds. The Effect of CO2 Concentration on Children's Well-Being during the Process of Learning. **Energies**, v. 13, n. 22:6099, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13226099>. Acesso em: 20 fev. 2021.

BRANCO, P.T.B.S *et al.* Children exposure to indoor air in urban nurseries - part I: CO2 and comfort assessment. **Environmental Research**, v. 140, p. 1-9, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2015.03.007>. Acesso em: 10 nov. 2021.

BRASIL. **Decreto N° 7.566, de 23 de setembro de 1909.** Cria nas capitais dos Estados da República Escolas de Aprendizes Artífices. Publicado no Diário Oficial em 26 set. 1909, página 6975. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1900-1909/decreto-7566-23-setembro-1909-525411-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 26/05/2020.

BRASIL. **Decreto-Lei N° 4.127, de 25 de fevereiro de 1942.** Estabelece as bases de organização da rede federal de estabelecimentos de ensino industrial. Publicado no Diário Oficial da União - Seção 1 – 27 fev. 1942, Página 2957. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/declei/1940-1949/decreto-lei-4127-25-fevereiro-1942-414123-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 01/06/2020.

BRASIL. **Lei Federal n° 9394, de 20 de dezembro de 1996.** Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Publicado no Diário Oficial da União em 23 dez. 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm. Acesso em: 16 fev. 2021.

BRASIL. **Lei Federal n° 13005, de 25 de junho de 2014.** Aprova o Plano Nacional de Educação – PNE e dá outras providências. Publicado no Diário Oficial da União em 26 jun. 2014. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2014/lei/l13005.htm. Acesso em: 16 fev. 2021.

BRASIL. **Lei 6.437, de 20 de agosto de 1977.** Infrações à legislação sanitária federal. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6437.htm. Acesso em: 12/01/2020.

BRASIL. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Básica. **Parecer CNE/CEB n° 8/2010**, aprovado em 05 maio 2010. Disponível em: http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=5063-parecercne-seb8-2010&Itemid=30192. Acesso em: 16 fev. 2021.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **NR 17 – Ergonomia.** Redação dada pela Portaria/MTB n° 423, de 07 de outubro de 2021. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria/mtp-n-423-de-7-de-outubro-de-2021-351614985>. Acesso em: 12 maio 2022.

BRDARIĆ, D. *et al.* Indoor carbon dioxide concentrations in Croatian elementary school classrooms during the heating season. **Arh Hig Rada Toksikol**, v. 70, p. 296-302, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2478/aiht-2019-70-3343>. Acesso em: 10 nov. 2021.

BRICKUS, Leila S. R.; AQUINO NETO, Francisco R. de.. A Qualidade do Ar de Interiores e a Química. **Química Nova** [online]. 1999, vol.22, n.1, pp.65-74. ISSN 1678-7064. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40421999000100013>. Acesso em: 13 ago. 2020.

BRITO, G. F. S.; SODRÉ, F. F.; ALMEIDA, F. V. O Impacto do Material Particulado na Qualidade do Ar. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 5, p. 1335-1354, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180092> . Acesso em: 22 abr. 2022.

BUENO, F.T.C.; SOUTO, E.P.; MATTA, G.C. Notas sobre a trajetória da Covid-19 no Brasil. In: MATTA, G.C. *et al.* **Os impactos sociais da Covid-19 no Brasil:** populações vulnerabilizadas e respostas à pandemia [online]. Rio de Janeiro: Observatório Covid 19; Editora FIOCRUZ, 2021, p. 27-39. ISBN: 978-65-5708-032-0. DOI: <https://doi.org/10.7476/9786557080320.0002>. Acesso em: 11 fev. 2022.

CAI, Wei *et al.* Investigation of Microclimate and Air Pollution in the Classrooms of a Primary School in Wuhan. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 415-422, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1087>. Acesso em: 10 nov. 2021.

CAMMARATA, Alessandro; CAMMARATA, Giuliano. Dynamic assessment of the risk of airborne viral infection. **Indoor air**, v. 31, p. 1759-1775, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12862>. Acesso em: 20 fev. 2022.

CARMO, Adriano T.; PRADO, Racine T. A. **Qualidade do Ar Interno**. São Paulo: EPUSP, 1999. ISSN 1413-0386. Disponível em: http://dns.pcc.usp.br/files/text/publications/TT_00023.pdf. Acesso em: 12 fev. 2020.

Carro pega fogo na Avenida Beira-Mar, em Vitória. **G1 ES**. Vitória-ES, 13 ago. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espírito-santo/noticia/2021/08/13/carro-pega-fogo-na-avenida-beira-mar-em-vitoria.ghtml>. Acesso em: 15 abr. 2022.

CELLULAR RESPIRATION. In: BRITANNICA Academic, **Encyclopædia Britannica**. 13 mar. 2020. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/cellular-respiration>. Acesso em: 07 out. 2020.

CDC – Center for Disease Control and Prevention. **Ventilation in Buildings**, 02 jun. 2021. Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation.html>. Acesso em: 28 jun. 2021.

CEN – European Committee for Standardization. **EN 13779-2007: Ventilation for non-residential buildings** – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems. Brussels: CEN, 2007.

CIOTTI, Marco *et al.* The COVID-19 pandemic. **Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences**, v. 57, p. 365-388, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408363.2020.1783198>. Acesso em: 27 out. 2021.

CHATZIDIAKOU, Lia; MUMOVIC, Dejan; SUMMERFIELD, Alex. Is CO₂ a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part I: The interrelationships between thermal conditions, CO₂ levels, ventilation rates and selected indoor pollutants.

Building Services Engineering Research & Technology, v. 36, p.129-161, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F0143624414566244>. Acesso em: 22 nov. 2020.

CHEN, Paul Z. *et al.* Heterogeneity in transmissibility and shedding SARS-CoV-2 via droplets and aerosols. **eLife**, v. 10:e65774, 16 abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.7554/eLife.65774>. Acesso em: 09 nov. 2021.

CHEN, Qingyan. Can we migrate COVID-19 spreading risk? **Front Environ Sci Eng.**, 2021, v. 15, n. 35, 28 ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-020-1328-8>. Acesso em: 13 dez. 2021.

CIODES – Centro Integrado Operacional de Defesa Social. **Extrato de Atendimentos de Incêndio Realizados nos Municípios de Serra, Vitória, Vila Velha, Cariacica e Viana, entre os anos de 2017 a 2021**. Mensagem recebida por <professorsaulovieira@gmail.com> em 17 maio 2022.

COLEY, David A.; BEISTEINER, Alexander. Carbon Dioxide Levels and Ventilation Rates in Schools. **International Journal of Ventilation**, 2002, v. 1, n. 1, p. 45-52. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2002.11683621>. Acesso em: 01 set. 2020.

COLEY, David A.; GREEVES, R.; SAXBY, Brian K.. The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class. **International Journal of Ventilation**, v. 6, p. 107-112, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2007.11683770>. Acesso em: 29 nov. 2020.

COOLEY, *et al.* Correlation between the prevalence of certain fungi and sick building syndrome. **Occupational & Environmental Medicine**, v. 55, p. 579-584, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1136/oem.55.9.579>. Acesso em: 21 fev. 2021.

COLIN, S. V. **A poética maquinista**. 2011. Disponível em: <https://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2011/03/20/a-poetica-maquinista/> Acesso em: 08 de abril de 2020.

COMBER, Laula *et al.* Airborne transmission of SARS-CoV-2 via aerosols. **Reviews in Medical Virology**, v. 31, 26 out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/rmv.2184>. Acesso em: 16 dez. 2021.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2018.

DAI, Hui; ZHAO, Bin. Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. **Build Simulation**, v. 13, p. 1321-1327, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0703-5>. Acesso em: 17 nov. 2021.

DAWSON, Patrick *et al.* Pilot Investigation of SARS-CoV-2 Secondary Transmission in Kindergarten Through Grade 12 Schools Implementing Mitigation Strategies – St. Louis County and City of Springfield, Missouri, December 2020. **Morbidity and Mortality Weekly Report**, v. 70, n. 12, p. 449-455, 26 mar. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm7012e4>. Acesso em: 26 nov. 2021.

DE GIULI, Valeria; DA POS, Osvaldo; DE CARLI, Michele. Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools. **Building and Environment**, v. 56 (0), p.335-345, 2012. ISSN 0360-1323. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.024>. Acesso em: 23 nov. 2020.

DELIKHOON, Mahdiah *et al.* Modes of Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome-Coronavirus-2 (SARS-CoV-2) and Factors Influencing on the Airborne Transmission: A Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, 395, 06 jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18020395>. Acesso em: 14 dez. 2021.

DENG, Shihan; LAU, Josephine. Seasonal variations of indoor air quality and thermal conditions and their correlations in 220 classrooms in the Midwestern United States. **Building and Environment**, 157, 79–88, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.038>. Acesso em: 04 maio 2020.

DI GILIO, Alessia *et al.* CO2 concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. **Environmental Research**, v. 202, 111560, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>. Acesso em: 03 nov. 2021.

DILGUERIAN, Mirian G.. **Síndrome do edifício doente**: responsabilidade civil da municipalidade diante do Estatuto da Cidade. 1 ed. São Paulo: Editora Letras Jurídicas, 2005. ISBN 85-89917-11-8.

DORIZAS, P. V.; ASSIMAKOPOULOS, M.N.; HELMIS, C.; SANTAMOURIS, M.. An integrated evaluation study of the ventilation rate, the exposure and the indoor air quality in naturally ventilated classrooms in the Mediterranean region during spring. **Science of the Total Environment**, v. 502, p.557-570, 2015. ISSN 0048-9697. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.060>. Acesso em: 29 nov. 2020.

DUARTE, Rogério; GOMES, Maria da G.; RODRIGUES, António M.. Classroom ventilation with manual opening of windows: Findings from a two-year-long experimental study of a Portuguese secondary school. **Building and Environment**, v. 124, p. 118-129, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.041>. Acesso em: 10 mar. 2021.

DUILL, Finn F. *et al.* The Impact of Large Mobile Air Purifiers on Aerosol Concentration in Classrooms and the Reduction of Airborne Transmission of SARS-CoV-2. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, 11523, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph182111523>. Acesso em: 08 nov. 2021.

EFRON, B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. **Annals of Statistics**, v.7, p.1–26, 1979. DOI: <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>. Acesso em: 15 maio 2022.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Why Indoor Air Quality is Important to Schools**. EPA, out. 2018. Disponível em: <https://www.epa.gov/iaq-schools/why-indoor-air-quality-important-schools>. Acesso em: 20 jun. 2020.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Managing asthma in the school environment**. EPA, dez. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/iaq-schools/managing-asthma-school-environment>. Acesso em: 08 dez. 2020.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Asthma Triggers: Gain Control**. EPA, dez. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/asthma/asthma-triggers-gain-control>. Acesso em: 08 dez. 2020.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Indoor Air Facts N°. 4: Sick Building Syndrome**. EPA, fev. 1991. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/sick_building_factsheet.pdf. Acesso em: 09 dez. 2020.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)**. Disponível em: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>. Acesso em: 20 jan. 2021.

FEIDEN, Alessandra C.; MELLO, Cláudio R. C. Villa Savoye: síntese do pensamento Corbusiano. **Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, p. 178-188, 2021. ISSN 2358-6036. DOI: <https://doi.org/10.33053/revint.v9i1.637>. Acesso em: 05 abr. 2022.

FENGER, Jes. Air pollution in the last 50 years – From local to global. **Atmospheric Environment**, [s.l.], v. 43, p. 13-22, 2009. ISSN 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.061>. Acesso em: 07 out. 2020.

FERREIRA, Ana; CARDOSO, Massano. Qualidade do Ar e Saúde em Escolas localizadas em freguesias predominantemente urbanas, rurais e medianamente urbanas. **Hygeia – Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, v.9, n.17, p.95-115, dez. 2013. ISSN 1980-1726. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/22503>. Acesso em: 16 nov. 2020.

FIGUEIREDO, Lucas. Desurbanismo: um manual rápido de destruição de cidades. **Urbanidades**. Rio de Janeiro: Folio Digital: Letra e Imagem, p. 209-234, 2012. Disponível em: <https://www.anparq.org.br/dvd-enanparq/simposios/163/163-305-1-SP.pdf>. Acesso em: 21 out. 2020.

FISHER, G. *et al.* Radon Mitigation in Schools Utilising Heating, Ventilating and Air Conditioning Systems. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 56, p. 51-54, 1994. DOI: <https://doi-org.ez120.periodicos.capes.gov.br/10.1093/oxfordjournals.rpd.a082421>. Acesso em: 16 fev. 2021.

FISK, W. J. The ventilation problem in schools: literature review. **Indoor Air**, v. 27, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12403>. Acesso em: 30 nov. 2020.

FRAMPTON, Kenneth. **História Crítica da Arquitetura Moderna**. 2 ed. São Paulo: Martins Fontes, 1997.

FSADNI, Peter *et al.* Impact of school air quality on children's respiratory health. **Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine**, v. 22, p.156-162, 2018. DOI: https://doi.org/10.4103/ijoem.ijoem_95_18. Acesso em: 20 jan. 2021.

FUOCO, Fernanda Carmen *et al.* Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Italian Classrooms. **Atmosphere**, v. 6(11), p. 1652-1675, 2015. ISSN 2073-4433. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos6111652>. Acesso em: 13 nov. 2020.

GABRIEL, Marta F. *et al.* Environmental quality in primary schools and related health effects in children. An overview of assessments conducted in the Northern Portugal. **Energy & Buildings**, v. 250, 111305, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111305>. Acesso em: 13 dez. 2021.

GAIHRE, Santos *et al.* Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment. **Journal of School Health**, v. 84, p. 569-574, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/josh.12183>. Acesso em: 04 mai 2020.

GAO, Jie; WARGOCKI, Pawel; WANG, Yi. Ventilation system type, classroom environmental quality and pupils's perceptions and symptoms. **Building and Environment**, v. 75, p.46-57, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.015> . Acesso em: 24 nov. 2020.

GETTINGS, Jenna *et al.* Mask Use and Ventilation Improvements to Reduce COVID-19 Incidence in Elementary Schools – Georgia, November 16-December 11, 2020. **Morbidity and Mortality Weekly Report**, v. 70, n. 21, p. 779-784, 28 maio 2021. DOI: <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm7021e1>. Acesso em: 17 nov. 2021.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2018. ISBN 978-85-97-01292-7.

GINA – Global Initiative For Asthma. **Global Strategy for Asthma Management and Prevention**. GINA, 2020. www.ginasthma.org. Disponível em: https://ginasthma.org/wp-content/uploads/2020/04/GINA-2020-full-report_-final-wms.pdf. Acesso em: 09 dez. 2020.

GIODA, Adriana; AQUINO NETO, Francisco R. de. Poluição Química Relacionada ao Ar de Interiores no Brasil. **Química Nova**, v. 26, n. 03, p. 359-365, 2003. ISSN 1678-7064. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000300013>. Acesso em: 10 set. 2019.

GODISH, Thad. **Indoor environmental quality**. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2000. ISBN 1-56670-402-2.

GODWIN, Lara *et al.* Which factors influence the extent of indoor transmission of SARS-Cov-2? A rapid evidence review. **Journal of Global Health**, v. 11, 10002, 2021. DOI: <https://doi.org/10.7189/jogh.11.10002>. Acesso em: 23 nov. 2021.

GONÇALVES, Fábio M.; FLORES, Laís R.. Espaços livres em escolas: Questões para de bate. In: AZEVEDO, Giselle. A. N.; RHEINGANTZ, Paulo A.; TÂNGARI, Vera (org.). **O Lugar do pátio escolar no sistema de espaços livres** – uso, forma e apropriação. 2. ed. 2017. Rio de Janeiro: Rio Books, 2017. p. 25-36. ISBN 978-85-61556-95-2.

GRUBB, Deborah; DIAMANTES, Thomas. Is your school sick? Five threats to healthy schools. **The Clearing House**, v. 71, p. 202, 1998. ISSN 0009-8655. DOI: <https://doi.org/10.1080/00098659809599361>. Acesso em: 17 fev. 2021.

HADDAD, Shamila *et al.* On the potential of demand-controlled ventilation system to enhance indoor air quality and thermal condition in Australian school classrooms. **Energy and Buildings**, v. 238, 110838, 01 maio 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110838>. Acesso em: 12 abr. 2022.

HARCAROVÁ, K. Indoor air quality in classrooms of a newly built school. **Materials Science and Engineering**, v. 867, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/867/1/012008. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/867/1/012008/meta>. Acesso em: 10 mar. 2021.

HARREL, Frank E. **Regression Modeling Strategies**: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis. New York: SPRINGER, 2001. ISBN 978-1-4419-2918-1.

HERACLEOUS, C.; MICHAEL, A. Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. **Journal of Building Engineering**, v. 26, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100917>. Acesso em: 10 mar. 2021.

HESS-KOSA, Kathleen. **Indoor air quality: the latest sampling and analytical methods**. 3 ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2019. ISBN 9781315098180.

HONEIN, Margaret A. *et al.* Summary of Guidance for Public Health Strategies to Address High Levels of Community Transmission of SARS-CoV-2 and Related Deaths, December 2020. **Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR)**, v. 69 (49), p. 1860-1867, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6949e2>. Acesso em: 09 nov. 2021.

HOU, Yuefei; LIU, Junjie; LI, Jiayu. Investigation of Indoor Air Quality in Primary School Classrooms. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 830-837, 2015. ISSN 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.037>. Acesso em: 29 nov. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Censo Demográfico 1960, 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010**. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8>. Acesso em: 18 jun. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Frota de veículos**. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 01 abr. 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais – COPIS. **Pesquisa Nacional de Saúde do Escolar**, Amostra 2, 2015. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9134-pesquisa-nacional-de-saude-do-escolar.html?=&t=resultados>. Acesso em: 18 jun. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 16 maio 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Coordenação de Geografia. **Regiões de Influência das Cidades: 2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. ISBN 978-65-87201-04-7. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101728.pdf>. Acesso em 30 out. 2020.

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Relatório da Qualidade do Ar na Grande Vitória 2019**. Cariacica: IEMA, 2020. Disponível em: <https://iema.es.gov.br/qualidadedoar/relatorios>. Acesso em: 10 fev. 2020.

IFES, Instituto Federal do Espírito Santo. **Institucional**. Disponível em: <https://ifes.edu.br/institucional>. Acesso em: 20 maio 2020.

IFES, Instituto Federal do Espírito Santo. **O Ifes**. Disponível em: <https://ifes.edu.br/o-ifes>. Acesso em: 20 maio 2020.

Ifes publica nova portaria sobre retorno presencial ao trabalho. **Ifes**, 2021. Disponível em: <https://ifes.edu.br/noticias-servidor/20177-ifes-publica-nova-portaria-sobre-retorno-presencial-ao-trabalho>. Acesso em: 13 abr. 2022.

IJSN – Instituto Jones dos Santos Neves. **Região Metropolitana da Grande Vitória – RMGV**. Sistema gestor e informações básicas. Vitória: ISNJ, 2005. Disponível em: http://www.ijsn.es.gov.br/ConteudoDigital/20120829_rmgv_sistemagestordeinformacoesbasicas.pdf. Acesso em: 30 out. 2020.

Incêndio atinge apartamento em Vitória. **G1 ES**. Vitória-ES, 15 set. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espírito-santo/noticia/2021/09/15/incendio-atinge-apartamento-em-vitoria.ghtml>. Acesso em: 15 abr. 2022.

INCAPER – Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Gráficos da Série Histórica – Vitória-ES**. 2021. Disponível em: <https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-vitoria>. Acesso em: 23 abr. 2022.

INEP – Instituto Nacional De Estudos E Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Média de Horas-aula diária - Brasil, Regiões Geográficas e Unidades da Federação – 2019**. Disponível em: <http://portal.inep.gov.br/web/guest/indicadores-educacionais>. Acesso em: 22 jun. 2020.

INEP – Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Média de Alunos por Turma – 2019**. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/indicadores-educacionais/media-de-alunos-por-turma>. Acesso em: 09 ago. 2021.

INEP – Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Resposta Educacional à Pandemia de Covid-19 no Brasil**. Censo escolar 2020. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/pesquisas-estatisticas-e-indicadores/censo-escolar/pesquisas-suplementares/pesquisa-Covid-19>. Acesso em: 11 fev. 2022.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos**. Estação Vitória A612. 2022. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 23 abr. 2022.

JABOUR DE FRANÇA, C.; BERGAMASCHI, Rodrigo B.. Mapeamento das áreas periurbanas do Espírito Santo. **Texto para discussão**, n.24, ISJN, 2011, 32p.. ISJN – Instituto Jones dos Santos Neves. ISBN 978-85-62509-69-8. Disponível em: <http://www.ijsn.es.gov.br/component/attachments/download/5106>. Acesso em: 30 out. 2020.

JAN, Rohi *et al.* Exposure assessment of children to particulate matter and gaseous species in school environments of Pune, India. **Building and Environment**, v. 111, p. 207-217, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.008>. Acesso em: 10 nov. 2021.

JARDIM, Warley S.; CARDOSO, Kaíque M.; JESUS, Carla P. Caracterização e utilização de três espécies da arborização urbana no biomonitoramento de material particulado. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 9, n. 2, p. 23-32, 2021. ISSN 2595-4431. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5550799>. Acesso em: 25 abr. 2022.

JARVIS, Michael C. Aerosol Transmission of SARS-CoV-2: Physical Principles and Implications. **Frontiers in Public Health**, v. 8, 590041, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.590041>. Acesso em: 10 nov. 2021.

KAMARUDDIN, Anis S.; JALALUDIN, Juliana; CHOO, Chua P. Indoor Air Quality and Its Association with Respiratory Health among Malay Preschool Children in Shah Alam and Hulu Langat, Selangor. **Advances in Environmental Biology**, v. 9, p. 17-26, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275348374_Indoor_Air_Quality_and_Its_Association_with_Respiratory_Health_among_Malay_Preschool_Children_in_Shah_Alam_and_Hulu_Langat_Selangor. Acesso em: 20 jan. 2021.

KAPALO, Peter *et al.* Investigation of CO₂ production depending on physical activity of students. **International Journal of Environmental Health Research**, v. 29, n. 1, p. 31-44, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1506570>. Acesso em: 27 dez. 2020.

KAPOOR, Nishant Raj *et al.* A Systematic Review on Indoor Environmental Quality in Naturally Ventilated School Classrooms: A Way Forward. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 1-19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8851685>. Acesso em: 08 nov. 2021.

KARAPETIS, Alexandros; ALEXANDRI, Eleftheria. Indoor Environmental Quality and its Impacts on Health – Case Study: School Buildings. **5th International Conference “Energy in Buildings 2016”**, v. 1, p. 78-81, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317888474_Indoor_Environmental_Quality_and_its_Impacts_on_Health_-_Case_Study_School_Buildings. Acesso em: 28 nov. 2020.

KEELER, Marian; VAIDYA, Prasad. **Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018. 368p., 28cm. ISBN 978-85-8260-470-0.

KORSAVI, Sepideh S.; MONTAZAMI, Azadeh; MUMOVIC, Dejan. Indoor air quality (IAQ) in naturally-ventilated primary schools in the UK: Occupant-related factors. **Building and Environment**, v. 180, 2020. ISSN 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106992>. Acesso em: 18 ago. 2020.

KOWALTOWSKI, Doris C. C. K. **Arquitetura Escolar**: o projeto do ambiente de ensino. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. ISBN: 978-85-7975-011-3.

KLEPEIS, Neil E. *et al.* **The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS)**: A resource for assessing exposure to environmental pollutants, article. California: Berkeley National Laboratory, 2001. University of North Texas Libraries, UNT Digital Library. Disponível em: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc719357/> . Acesso em: 06 out. 2020.

KALIMERI, Krystallia K. *et al.* Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks: Two-season measurements in primary schools in Kozani, Greece. **Atmospheric Pollution Research**, v. 7, p. 1128-1142, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.002>. Acesso: 10 nov. 2021.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R.. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/publicacoes/livros>. Acesso em: 10 dez. 2020.

LAM-HINE, Tracy *et al.* Outbreak Associated with SARS-CoV-2 B.1.617.2 (Delta) Variant in an Elementary School – Marin County, California, May-June 2021. **Morbidity and Mortality Weekly Report**, v. 70, n. 35, p. 1214-1219, 03 set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm7035e2>. Acesso em: 10 dez. 2021.7

LAZOVIC, Ivan *et al.*. PM and CO2 variability and relationship in the different school environments. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**, v. 21 (1), p. 179-187, 2015. ISSN 2217-7434. DOI: <https://doi.org/10.2298/CICEQ140212020L>. Acesso em: 30 nov. 2020.

LE CORBUSIER. **Carta de Atenas**. CIAM - Congresso Internacional de Arquitetura Moderna, 1933. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Carta%20de%20Atenas%201933.pdf>. Acesso em: 08/04/2020.

LEBOWITZ, Michael D. Health Effects of Indoor Pollutants. **Annual Review of Public Health**, v. 4, p. 203-221, 1983. Disponível em: <https://www.annualreviews-org.ez120.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1146/annurev.pu.04.050183.001223>. Acesso em: 16 fev. 2021.

LEE, S. C.; MAUREEN, Chang. Indoor Air Quality Investigations at Five Classrooms. **Indoor Air**, v. 9, p. 134-138, 1999. ISSN 0905-6947. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.t01-2-00008.x>. Acesso em: 16 fev. 2021.

LEONÍDIO, Adalmir. Utopias sociais e cientificistas no Brasil, no final do século XIX. **Hist. cienc. saude-Manguinhos**, Rio de Janeiro, v. 14,n. 3, p. 921-946, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-59702007000300013>. Acesso em: 31 maio 2020.

LEVETIN, Estelle et al. Indoor air quality in schools: exposure to fungal allergens. **Aerobiologia**, v. 11, p. 27-34, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02136141>. Acesso em: 16 fev. 2021.

LIMA, Erika Roberta Silva; SILVA, Francisca Natália; SILVA, Lenina Lopes Soares. **Trajatória do Ensino Médio e da Educação Profissional no Brasil**. HOLOS, [S.l.], v. 3, p. 164-175, set. 2017. ISSN 1807-1600. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2017.5753>. Acesso em: 20 maio 2020.

LOVEC, Vesna; PREMROV, Miroslav; LESKOVAR, Vesna Z. Practical Impact of the COVID-19 Pandemic on Indoor Air Quality and Thermal Comfort in Kindergartens. A Case Study of Slovenia. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, 9712, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18189712>. Acesso em: 03 nov. 2021.

LUNG. In: BRITANNICA Academic, **Encyclopædia Britannica**. 03 jan. 2019. Disponível em: <https://academic-eb-britannica.ez120.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/lung/49375>. Acesso em: 07 out. 2020.

LUGG, Andrew B.; BATTY, Willian J. Air quality and ventilation rates in school classrooms I: Air quality monitoring. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 20, p. 13-21, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F014362449902000103>. Acesso em: 17 fev. 2021.

MA, Fusheng; ZHAN, Changhong; XU, Xiaoyang. Investigation and Evaluation of Winter Indoor Air Quality of Primary Schools in Severe Cold Weather Areas of China. **Energies**, v. 12, 1602, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12091602>. Acesso em: 09 nov. 2020.

MADUREIRA, Joana *et al.*. Indoor exposure to bioaerosol particles: levels and implications for inhalation dose rates in schoolchildren. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v.11, p.955-964, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0599-8>. Acesso em 30 nov. 2020.

MADUREIRA, J. *et al.* Indoor air quality in Portuguese schools: levels and sources of pollutants. **Indoor Air**, v. 26, p. 526-537, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12237>. Acesso em: 20 jan. 2021.

MAGALHÃES, M. A. de; TOSCANO, V. N.; BERGAMASCHI, R. B.. Área, densidade e população: uma análise econômica das diferenças entre áreas urbanas (...). **Texto para discussão**, n.47, ISJN, 2012, 31p.. ISJN – Instituto Jones dos Santos Neves. Disponível em: <http://www.ijsn.es.gov.br/component/attachments/download/1610>. Acesso em: 01 nov. 2020.

MAINKA, Anna; ZAJUSZ-ZUBEK, Elwira. Indoor Air Quality in Urban and Rural Preschools in Upper Silesia, Poland. **International journal of environmental research and public health**, v. 12 (7), p.7697-7711, 08 jul. 2015. ISSN 1660-4601. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph120707697>. Acesso em: 13 nov. 2020.

MAJD, Ehsan *et al.* Indoor air quality in inner-city schools and its associations with building characteristics and environmental factors. **Environmental Research**, v. 170, p. 83-91, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.012>. Acesso em: 03 abr. 2020.

MÄHLMANN, Fabiana G. **Conforto Ambiental**. Porto Alegre: SAGAH, 2018. ISBN 978-85-9502-718-3.

MARYLAND. Maryland State Dept of Education. Office of Administration and Finance. **Indoor Air Quality**: Maryland Public Schools, nov. 1987, 46p. Disponível em: <https://eric.ed.gov/?id=ED353695>. Acesso em: 16 fev. 2021.

MAURY, M. B. e BLUMENSCHNEIN, R. N.. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, 2012. Disponível em: http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/12110/1/ARTIGO_ProducaoCimentoImpacto.pdf . Acesso em: 22 mar. 2017.

MCCARTHY, Michael. Putin refuses to say if Russia will ratify Kyoto protocol. **Independent**, 30 set. 2003. Disponível em: <https://www.independent.co.uk/news/world/europe/putin-refuses-to-say-if-russia-will-ratify-kyoto-protocol-89100.html> . Acesso em: 10 out. 2020.

MEDEIROS NETA, O. M.; NASCIMENTO, J. M.; RODRIGUES, A. G. F.. **Uma Escola para Aprendizizes Artífices e o Ensino Profissional Primário Gratuito**. HOLOS, [S.l.], v. 2, p. 96-104, maio 2012. ISSN 1807-1600. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2012.919>. Acesso em: 20 maio 2020.

MEISS, Alberto *et al.* Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Classrooms. Lessons Learned from a Case Study in a COVID-19 Scenario. **Sustainability**, v. 13, 8446, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13158446>. Acesso em: 03 nov. 2021.

MEISS, Alberto *et al.* Implementation of a Ventilation Protocol for SARS-CoV-2 in Higher Educational Centre. **Energies**, v. 14, 6172, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14196172>. Acesso em: 04 nov. 2021.

MELGAR, Sérgio G. *et al.* Influence on indoor comfort due to the application of Covid-19 natural ventilation protocols for schools at subtropical climate during winter season. **E3S Web of Conferences**, v. 293, 01031, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129301031>. Acesso em: 03 nov. 2021.

MELLER, G. S. **Controle da poluição**. 1 ed. Porto Alegre: SAGAH, 2017. ISBN 978-85-9502-115-0.

MENDONÇA, Eneida M. S. A atuação de Henrique de Novaes no urbanismo da cidade de Vitória. In: SIMPÓSIO TEMÁTICO: ARQUITETOS E URBANISTAS, A CONTRIBUIÇÃO PARA A TEORIA E A PRÁTICA NO BRASIL, 1920-1960, 2010, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ENANPARQ, 2010. Disponível em: <https://www.anparq.org.br/dvd-enanparq/simposios/34/34-297-1-SP.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2022.

MESQUITA, Mayra S; ARAÚJO, Flora M.. Diagnóstico da qualidade do ar interno das edificações do campus da Unifor. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, p.163-170, 2006. E-ISSN: 2318-0730. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/78>. Acesso em: 11 jan. 2020.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. O que é a Covid-19? Online. 08 abr. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/coronavirus/o-que-e-o-coronavirus>. Acesso em: 10 ago. 2021.

MITCHELL, John W.; BRAUN, James E. **Princípios de Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de Ar em Edificações**. Tradução de Luiz Paulo de Oliveira. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. ISBN 978-85-216-3507-9.

MONGE-BARRIO, Aurora *et al.* Encouraging natural ventilation to improve indoor environmental conditions at schools. Case studies in the north of Spain before and during COVID. **Energy & Buildings**, v. 254, 111567, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111567>. Acesso em: 08 nov. 2021.

MONTANER, Josep Maria. **Sistemas arquitetônicos contemporâneos**. 1ªed. Barcelona (ESP): Editora Gustavo Gili, 2001.

MONTEIRO, Marcus. Nova avenida Vitória: 93% de obras concluídas e novo trecho todo em concreto. **Prefeitura de Vitória**, 2020. Disponível em: <https://www.vitoria.es.gov.br/noticias/noticia-41213#:~:text=A%20m%C3%A9dia%20di%C3%A1ria%20de%20circula%C3%A7%C3%A3o,1.747%20%C3%B4nibus%20e%201.014%20caminh%C3%B5es..> Acesso em: 05 abr. 2022.

MORAES, Alexandre Perri de. **Qualidade do ar interno com ênfase na concentração de aerodispersóides nos edifícios**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. DOI:10.11606/D.3.2006.tde-17112006-134242. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-17112006-134242/pt-br.php>. Acesso em: 12 jan. 2020.

MORAWSKA, Lidia; CAO, Junji. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. **Environment International**, v. 139, 10730, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>. Acesso em: 15 jan. 2022.

Morte de ministro levou o Governo a legislar a respeito. **Diário do Nordeste**, 21 dez. 2005. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/morte-de-ministro-levou-o-governo-a-legislar-a-respeito-1.517538>. Acesso em: 03 dez. 2020.

Motta morre após 12 dias de internação. **Folha de S. Paulo**, São Paulo, 20 abr. 1998. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/brasil/fc20049806.htm>. Acesso em: 03 dez. 2020.

MUMOVIC, D. *et al.*. Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England. **Building and Environment**, v. 44, p. 1466-1477, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.014>. Acesso em: 30 nov. 2020.

MUSCATIELLO, N. *et al.* Classroom conditions and CO₂ concentrations and teacher health symptom reporting in 10 New York State Schools. **Indoor Air**, v. 25, 2014. DOI: <https://doi-org.ez120.periodicos.capes.gov.br/10.1111/ina.12136>. Acesso em: 30 nov. 2020.

NASCIMENTO, Antonio P. *et al.* Association between the incidence of acute respiratory diseases in children and ambient concentrations of SO₂, PM₁₀ and chemical elements in fine particles. **Environmental Research**, v. 188, 109619, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109619>. Acesso em: 30 mar. 2022.

NASCIMENTO, Antônio P. *et al.* Association between the concentration of fine particles in the atmosphere and acute respiratory diseases in children. **Revista de Saúde Pública**, v. 51: 3, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590%2FS1518-8787.2017051006523>. Acesso em: 30 mar. 2022.

NICODEMO; Maria L. F.; PRIMAVESI, Odo. **Por que manter árvores na área urbana?** São Carlos: Embrapa, 2009. ISSN 1980-6841. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/82803/1/Documentos89.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2022.

Nova Avenida Vitória será inaugurada no aniversário da capital. **A Gazeta**, Vitória, 04 set. 2020. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/es/cotidiano/nova-avenida-vitoria-sera-inaugurada-no-aniversario-da-capital-0920>. Acesso em: 10 fev. 2021.

NOWACKI, Carolina de C. B.; RANGEL, Morgana B. A. **Química ambiental:** conceitos, processos e estudo dos impactos ao meio ambiente. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014. ISBN 978-85-365-3116-8.

OBSERVAVIX – Portal do Observatório de Indicadores da Cidade de Vitória. **Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV)**. Vitória, 2018. Disponível em:

<https://observavix.vitoria.es.gov.br/tema/38#:~:text=58%2F95%2C%20a%20Regi%C3%A3o%20Metropolitana,Viana%2C%20Vila%20Velha%20e%20Vit%C3%B3ria>.

Acesso em: 01 nov. 2020.

OBSERVAVIX – Portal do Observatório de Indicadores da Cidade de Vitória.

Evolução da frota de veículos da Região Metropolitana da Grande Vitória.

Vitória, 2019. Disponível em: <https://observavix.vitoria.es.gov.br/indicador/261>.

Acesso em: 01 nov. 2020.

OECD – Organization for Economic Cooperation and Development. **Education at a Glance 2019**: OECD Indicators. Paris: OECD Publishing, 2019. ISBN 978-92-64-88811-1. DOI: <https://doi.org/10.1787/f8d7880d-en>.. Acesso em: 09 ago. 2021.

OECD – Organizatino for Economic Cooperation and Development. Programme for International Student Assessment. **PISA 2015 Results (Volume II): Policies and Practices for Sucessful Schools**. Paris: OECD Publishing, 2016. ISBN: 978-92-64-26751-0. DOI: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264267510-en>. Acesso em: 09 ago. 2021.

PAGEL, Érica C.; ALVAREZ, Cristina E.; JÚNIOR, Neyval C. R.. Qualidade do Ar Interno (QAI) em uma Estação Científica na Antártica: Identificação de Fontes de Poluição e Estratégias de Controle. **Revista Hábitat Sustentable**, v. 6, n. 1., p. 60-71, 2016. ISSN 0719-0700. DOI: <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2016.06.01.07>. Acesso em: 22 jun. 2020.

PAVILONIS, Brian *et al.* Estimating aerosol trasmission risk of SARS-CoV-2 in New York City public schools during reopening. **Environmental Research**, v. 195, 110805, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110805>. Acesso em: 22 nov. 2021.

PELÁEZ, Luisa M. G. *et al.* Air quality status and trends over large cities in South America. **Environmental Science and Policy**, v. 114, p. 422-435, 2020. ISSN 1462-9011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.009>. Acesso em: 10 ago. 2021.

PENG, Zhen; DENG, Du; TENORIO, Rosangela. Investigation of Indoor Air Quality and the Identification of Influential Factors at Primary Schools in the North of China. **Sustainability**, v. 9, 1180, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9071180>. Acesso em: 10 mar. 2021.

PEQUENO, Luis Renato B.. **Políticas habitacionais, favelização e desigualdades sócio-espaciais nas cidades brasileiras**: transformações e tendências. 2008. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/cc3a/9d1f61009c61a4a713e6a814fcc1e9f79225.pdf>. Acesso em: 21 out. 2020.

PEREIRA, Daniela C. A. **Poluição em ambientes internos**. Caracterização de espécies no material particulado de atmosferas escolares. 2018. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade de São Paulo,

São Paulo, 2018. DOI:10.11606/D.46.2018.tde-12042018-094059. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46136/tde-12042018-094059/pt-br.php>. Acesso em: 22 abr. 2022.

PINTO, Wanderson de P.; REISEN, Valdério A.; MONTE, Edson Z. Previsão da concentração de material particulado inalável, na Região da Grande Vitória, ES, Brasil, utilizando o modelo SARIMAX. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 02, p. 307-318. ISSN 1809-4457. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018168758>. Acesso em: 20 mar. 2022.

PMV - Prefeitura Municipal de Vitória. Evolução Urbana. **Vitoria.es**, Vitória, 26 jan. 2016. Disponível em: <https://www.vitoria.es.gov.br/cidade/evolucao-urbana>. Acesso em: 03 nov. 2020.

PMV – Prefeitura Municipal de Vitória. Dados Geográficos. **Vitoria.es**, Vitória, set. 2014. Disponível em: <http://legado.vitoria.es.gov.br/regionais/geral/geograficos.asp>. Acesso em: 03. nov. 2020.

PMV – Prefeitura Municipal de Vitória. Vitória 468 anos: curiosidades da avenida história que leva nome da cidade. **Vitoria.es**, Vitória, 06 set. 2019. Disponível em: <https://m.vitoria.es.gov.br/noticia/vitoria-468-anos-curiosidades-na-avenida-historica-que-leva-nome-da-cidade-37117>. Acesso em: 19 fev. 2021.

Poluição, a ameaça invisível. Pesquisa revela: é perigoso respirar na Grande São Paulo. **O Globo**, Rio de Janeiro, 31 nov. 1970, Poluição, p. 6. Disponível em: <https://acervo.oglobo.globo.com/busca/?busca=%22polui%C3%A7%C3%A3o+do+ar%22#>. Acesso em: 10 out. 2020.

Poluição do ar: cidade está na faixa anormal 20 horas por dia. **O Globo**, Rio de Janeiro, 16 out. 1972, p. 2. Disponível em: <https://acervo.oglobo.globo.com/busca/?busca=%22polui%C3%A7%C3%A3o+do+ar%22#>. Acesso em: 10 out. 2020.

PORFÍRIO, Francisco. "Positivismo"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/sociologia/positivismo.htm>. Acesso em 30 de maio de 2020.

PORTUGAL. Ministério da Educação e Ciência. Direção Geral da Administração Escolar. **Normas para Concepção e Construção de Escolas Básicas**. 2004. Disponível em: https://www.dgae.mec.pt/download/escportestrangeiro/reconhecimento/orientacoes_para_a_concecao_e_construcao_de_escolas/20040101_eepe_NormasConstrucaoEscBasParte1.pdf. Acesso em: 23 mar. 2022.

QUADROS, Marina E.. **Qualidade do ar em ambientes internos hospitalares: parâmetros físico-químicos e microbiológicos**. 2008. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/91068>. Acesso em: 14 fev. 2020.

Quanto custa limpar o ar que respiramos? **O Globo**, Rio de Janeiro, 11 jun. 1978, Economia, p. 23. Disponível em: <https://acervo.oglobo.globo.com/busca/?busca=%22polui%C3%A7%C3%A3o+do+ar%22#>. Acesso em: 10 out. 2020.

QUIRINO, Luana M. de M.; PEREIRA, Yasmin V. C.; LEDER, Solange M.. Aberturas para a educação: proposta de um sistema de captação de luz e ventilação natural em salas de aula. In: LEDER, S. M.; NOGUEIRA, B. L. N.; LIMA, A. V. P.. **Arquitetura e Conforto Ambiental nos Trópicos**: coletânea de estudos e pesquisas do LabCon – UFPB de 2009 a 2018. João Pessoa: Editora UFPB, 2019. ISBN 978-85-237-1442-0. Disponível em: <http://www.editora.ufpb.br/sistema/press5/index.php/UFPB/catalog/view/575/485/2918-1>. Acesso em: 10 dez. 2020.

RAMALHO, Olivier *et al.* Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values. **Building and Environment**, v. 93, p. 115 – 124, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.018>. Acesso em: 10 nov. 2021.

RAZALI, Nikmatun Y. Y. *et al.* Concentration of particulate matter, CO and CO₂ in selectec schools in Malaysia. **Building and Environment**, v. 87, p. 108-116, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.015>. Acesso em: 20 jan. 2021.

Report: No part of U.S. immune from dirty air. **CNN - Cable News Network**, 23 mai. 2000. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2000/US/05/23/bad.air/>. Acesso em: 08 out. 2020.

ROCHA, Julio C.; ROSA, André H.; CARDOSO, Arnaldo A.. **Introdução à Química Ambiental**. 2. ed.. Porto Alegre: Bookman, 2009. ISBN 978-85-7780-469-6.

ROCHA-MELOGNO, Lucas *et al.* Quantitative risk assessment of COVID-19 aerosol transmission indoors: a mechanistic stochastic web application. **Environmental Technology**, 13 nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1998228>. Acesso em: 17 nov. 2021.

ROUMIEH, Ivete Y. Fatores que Impactam na Qualidade do Ar Interior. Dez, 2017. Disponível em: <http://www.engenhariaearquitectura.com.br/2017/12/fatores-que-impactam-na-qualidade-do-ar-interior>. Acesso em: 20 out. de 2019.

SANTOS, Marco Aurélio dos (org.). **Poluição do Meio Ambiente**. 1. ed. Rio de janeiro: LTC, 2017. ISBN 978-85-216-3413-3.

SARBU, Ioan; SEBARCHIEVICI, Calin. Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 410-419, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.005>. Acesso em: 28 nov. 2020.

SATISH, U.; MENDELL, M. J.; SHEKHAR, K.; HOTCHI, T.; SULLIVAN, D.; STREUFERT, S.; FISK, W. J. Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. **Environmental health perspectives**, v.120, n.12, p.1671–1677, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>. Acesso em: 03 set. 2020.

SCHIBUOLA, Luigi; SCARPA, Massimiliano; TAMBANI, Chiara. Natural ventilation level assessment in a school building by CO₂ concentration measures. **Energy Procedia**, v. 101, p. 257-264, 2016. ISSN 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.033>. Acesso em: 10 nov. 2020.

SCHIBUOLA, Luigi; TAMBANI, Chiara. Indoor environmental quality classification of school environment by monitoring PM and CO₂ concentration levels. **Atmospheric Pollution Research**, v.11, p. 332-342, 2020. ISSN 1309-1042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.11.006>. Acesso em: 01 set. 2020.

SCHIRMER, Waldir N. et. al. A Poluição do Ar em Ambientes Internos e a Síndrome dos Edifícios Doentes. **Ciência e saúde coletiva**, Rio de Janeiro, v.16, n. 8, p. 3583-3590, ago. 2011. Disponível em: <http://www.cienciaesaudecoletiva.com.br/artigos/a-poluicao-do-ar-em-ambientes-internos-e-a-sindrome-dos-edificios-doentes/3063?id=3063>. Acesso em: 13 set. 2019.

SCHUCHMANN, Alexandra Z. *et al.* Isolamento social vertical X Isolamento social horizontal: os dilemas sanitários e sociais no enfrentamento da pandemia de COVID-19 / Vertical social isolation X Horizontal social isolation: health and social dilemmas in coping with the COVID-19 pandemic. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 3, n. 2, p. 3556-3576, 2020. ISSN 2596-6825. DOI: <https://doi.org/10.34119/bjhrv3n2-185>. Acesso em: 12 fev. 2021

SCOTFORD, Eloise. Rethinking Clean Air: Air Quality Law and COVID-19. **Journal of Environment Law**, v. 32, ed.3, p. 349-353, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093%2Fjel%2Fqaa027>. Acesso em: 12 fev. 2021.

SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N.. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. 3 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2016. ISBN 978-1-118-94740-1.

SHAMSI, Salman *et al.* Do environmental pollutants carrier to COVID-19 pandemic? A cross-sectional analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, 20 out. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17004-5>. Acesso em: 09 nov. 2021.

SHENDELL, D. G. *et al.* Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. **Indoor Air**, v. 14, p. 333-341, out. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>. Acesso em: 04 maio 2020.

SMEDJE, Greta; NORBACK, Dan; EDLING, Christer. Subjective Indoor Air Quality in Schools in Relation to Exposure. **Indoor Air**, v. 7, p. 143-150. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1997.00009.x>. Acesso em: 16 fev. 2021.

SMEDJE, G.; NORBACK, D.; EDLING, C. Asthma among secondary schoolchildren in relation to the school environment. **Clinical and Experimental Allergy**, v. 27, p. 1270-1278, 1997. ISSN 0954-7894. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.1997.tb01171.x>. Acesso em: 16 fev. 2021.

STABILE, Luca *et al.* The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. **Science of the Total Environment**, v. 595, p. 894-902, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.048>. Acesso em: 11 fev. 2021.

STABILE, L. *et al.* Ventilation procedures to minimize the airborne transmission of viruses in classrooms. **Building and Environment**, v. 202, 108042, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108042>. Acesso em: 03 nov. 2021.

STANFIELD, Cindy L. **Fisiologia humana**. 5ed. São Paulo: Pearson Educational do Brasil, 2013. ISBN 978-85-8143-634-0.

SUETH, José C. R.; MELLO, José C.; DEORCE, Mariluz S.; NUNES, Reginaldo F. **A Trajetória de 100 Anos dos Eternos Titãs: da Escola de Aprendizes Artífices ao Instituto Federal**. 1ª ed. Vitória, ES: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, 2009.

SUNDELL, J. On the history of indoor air quality and health. **Indoor Air**, v. 14, p. 51-58, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>. Acesso em: 07 out. 2020.

TANG, J. W. *et al.* Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2). **Journal of Hospital Infection**, v. 110, p. 89-96, 13 jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.12.022>. Acesso em: 16 dez. 2021.

TER BRAAK, Cajo J. F. 1992. Permutation Versus Bootstrap Significance Tests in Multiple Regression and ANOVA. In: JÖCKEL *et al.* Bootstrapping and Related Techniques. **Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems**, v. 376 . DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-48850-4_10. Acesso em: 15 maio 2022.

TOYINBO, Oluyemi. **Chapter 4 - Indoor Environmental Quality**. Sustainable Construction Technologies. Oxônia, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2019. ISBN

9780128117491. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00003-1>. Acesso em: 28 set. 2020.

TOYINBO, Oluyemi; PHIPATANAKUL, Wanda; SHAUGHNESSY, Richard; HAVERINEN-SHAUGHNESSY, Ulla. Building and indoor environmental quality assessment of Nigerian primary schools: A pilot study. **Indoor Air**, v. 29, p. 510-520, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12547>. Acesso em: 20 jan. 2021.

TRAN, Dinh T.; ALLEMAN, Laurent Y.; CODDEVILLE, Patrice; GALLOO, Jean-Claude. Indoor particle dynamics in schools: determination of air exchange rate, size-resolved particle deposition rate and penetration factor in real-life conditions. **Indoor and Built Environment**, v. 26(10), p. 1335-1350, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F1420326X15610798>. Acesso em: 09 nov. 2020.

TRILLES, Sergio et al. Data on CO2, temperature and air humidity records in Spanish classrooms during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic. **Data in Brief**, v. 39, 107489, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107489>. Acesso em: 03 nov. 2021.

UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Situação da educação no Brasil** (por região/estado – nov. 2021). 25 nov. 2021. Disponível em: <https://pt.unesco.org/fieldoffice/brasil/covid-19-education-Brasil>. Acesso em: 20 fev. 2022.

UNFPA, United Nations Population Fund. **Situação da População Mundial 2019**. Disponível em: https://brazil.unfpa.org/sites/default/files/pub-pdf/situacao_da_populacao_mundial_final.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision** (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. Acesso em: 07 out. 2020

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). **World Population Prospects 2019**, Online Edition. Rev. 1. (ST/ESA/SER.A/427) Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>. Acesso em: 18 jun. 2020

USHMM – United Nations Holocaust Memorial Museum. **Gassing Operations Abridged**. Disponível em: <https://encyclopedia.ushmm.org/content/pt-br/article/gassing-operations-abridged-article#:~:text=Os%20nazistas%20iniciaram%20as%20experi%C3%AAs,carbono%20puro%20e%20produzido%20quimicamente>. Acesso em: 08 jan. 2021.

VASSELLA, Claudia C. *et al.* From spontaneous to strategic natural window ventilation: Improving indoor air quality in Swiss schools. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 234, 113746, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113746>. Acesso em: 17 nov. 2021.

VELAVAN; Thirumalaisamy P.. MEYER, Christian G. The COVID-19 epidemic. **Tropical Medicine and International Health**, v. 25, n.3, p. 278-280, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/tmi.13383>. Acesso em: 28 out. 2021.

Vídeo mostra lancha pegando fogo em Vitória. **G1 ES**, Vitória-ES, 28 jul. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espirito-santo/noticia/2021/07/28/lancha-pegando-fogo-em-vitoria.ghtml>. Acesso em: 14 abr. 2022.

VILLANUEVA, Florentina *et al.* Assessment of CO₂ and aerosol (PM_{2,5}, PM₁₀, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: The case of a metropolitan area in Central-Southern Spain. **Environmental Research**, v. 197, 111092, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111092>. Acesso em: 10 nov. 2021.

VILCEKOVÁ, Silvia *et al.* Investigation of Indoor Environmental Quality in Classroom – Case Study. **Procedia Engineering**, v. 190, p. 496 – 503, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.369>. Acesso em: 20 fev. 2021.

Vitória é promovida a metrópole em classificação do IBGE. **A Gazeta**, Vitória-ES, 25 jun. 2020. Disponível em: [https://www.agazeta.com.br/es/economia/vitoria-e-promovida-a-metropole-em-classificacao-do-ibge-0620#:~:text=Vit%C3%B3ria%2C%20no%20Esp%C3%ADrito%20Santo%2C%20asim,Geografia%20e%20Estat%C3%ADstica%20\(IBGE\)](https://www.agazeta.com.br/es/economia/vitoria-e-promovida-a-metropole-em-classificacao-do-ibge-0620#:~:text=Vit%C3%B3ria%2C%20no%20Esp%C3%ADrito%20Santo%2C%20asim,Geografia%20e%20Estat%C3%ADstica%20(IBGE)). Acesso em: 31 out. 2020.

VOLPP, Kevin G. *et al.* Minimal SARS-CoV-2 Transmission After Implementation of a Comprehensive Mitigation Strategy at a School – New jersey, August 20-November 27, 2020. **Morbidity and Mortality Weekly Report**, v. 70, n. 11, p. 377-381, 19 mar. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm7011a2>. Acesso em: 24 nov. 2021.

VOURIOT, Carolanne V. M. *et al.* Seasonal variation in airborne infection risk in schools due to changes in ventilation inferred from monitored carbon dioxide. **Indoor Air**, v. 31, p. 1154-1163, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12818>. Acesso em: 24 nov. 2021.

WARD, Jeremy P. T.; WARD, Jane; LEACH, Richard M. **Fisiologia básica do sistema respiratório**. 3ed. Barueri, SP: Manole, 2012. ISBN 978-85-204-4964-6.

WEST, John B.. **Fisiologia Respiratória: princípios básicos**. 9ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. ISBN 978-85-65852-79-1.

WHO – World Health Organization. **WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants**. Copenhagen: World Health Organization, 2010. ISBN 978 92 890 02134. Disponível em: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2010/who-guidelines-for-indoor-air-quality-selected-pollutants>. Acesso em: 20 jan. 2021.

WHO – World Health Organization. **WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**. Global update 2005. Copenhagen: World Health Organization, 2005. ISBN 9289021926. Disponível em: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/Housing-and-health/publications/pre-2009/air-quality-guidelines.-global-update-2005.-particulate-matter,-ozone,-nitrogen-dioxide-and-sulfur-dioxide>. Acesso em: 20 jan. 2021

WHO – World Health Organization. **Asthma**. Genebra: World Health Organization, 20 mai. 2020. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/asthma>. Acesso em: 09 dez. 2020.

WHO – World Health Organization. **Burden of disease from the joint effects of household and ambient Air pollution for 2016**. Genebra: World Health Organization, 2018. Disponível em: https://www.who.int/airpollution/data/AP_joint_effect_BoD_results_May2018.pdf. Acesso em: 02 out. 2020.

WHO – World Health Organization. **Chronic obstructive pulmonary disease (COPD)**. Genebra: World Health Organization, 01 dez. 2017. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-\(copd\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd)). Acesso em: 09 dez. 2020.

WHO – World Health Organization. **Air Pollution. Guidelines**. Genebra: World Health Organization, 2020. Disponível em: <https://www.who.int/airpollution/guidelines/en/>. Acesso em 07 jan. 2021.

WHO – World Health Organization. **COVID-19 Dashboard**. Genebra: World Health Organization, 2022. Disponível em: <https://covid19.who.int/>. Acesso em: 16 maio 2022.

WHO – World Health Organization. **Naming the coronavirus disease (COVID-19) and the virus that causes it**. Copenhagen: World Health Organization, 2021. Disponível em: [https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/naming-the-coronavirus-disease-\(covid-2019\)-and-the-virus-that-causes-it#:~:text=Official%20names%20have%20been%20announced,%2DCoV%2D2\).](https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/naming-the-coronavirus-disease-(covid-2019)-and-the-virus-that-causes-it#:~:text=Official%20names%20have%20been%20announced,%2DCoV%2D2).) Acesso em: 28 out. 2021.

WHO – World Health Organization. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon**

monoxide. Copenhagen: World Health Organization, 2021. ISBN 9789240034228. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. Acesso em: 11 abr. 2022.

WMO - World Meteorological Organization. **Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Base on Global Observations throught 2015**. n. 12, 24 out. 2016. ISSN 2078 – 0796. Disponível em: http://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3084. Acesso em: 28 mar. 2017.

XU, Chunwen *et al.* Prediction and control of aerosol transmission of SARS-CoV-2 in ventilated context: from source to receptor. **Sustainable Cities and Society**, v. 76, 103416, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103416>. Acesso em: 10 dez. 2021.

XU, Yifang *et al.* Airborne infection risks of SARS-CoV-2 in U.S. schools and impacts of different intervention strategies. **Sustainable Cities and Society**, v. 74, 103188, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103188>. Acesso em: 25 nov. 2021.

YANG, Jinho *et al.* Characteristics of indoor air quality at urban elementary schools in Seoul, Korea: Assessment of effect of surrounding environments. **Atmospheric Pollution Research**, v. 6, p. 1113-1122, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2015.06.009>. Acesso: 10 nov. 2021.

ZEVI, Bruno. **Linguagem Moderna da Arquitetura**. 1ª ed. Lisboa (PT): Publicações Dom Quixote, 1984.

ZIVELONGHI, Alessandro; LAI, Massimo. Mitigating aerosol infection risk in school buildings: the role of natural ventilation, volume, occupancy and CO₂ monitoring. **Building and Environment**, v. 204, 108139, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108139>. Acesso em: 03 nov. 2021.

1976: Eclode “doenças dos legionários”. **DW - Deutsche Welle**. Disponível em: <https://p.dw.com/p/1LJ3>. Acesso em 12 fev. 2020.

APÊNDICE A

Princípios da fisiologia respiratória e sua relação com a qualidade do ar

Existem muitos fatores que influenciam na qualidade do ambiente interno de uma edificação, podendo ser de natureza biológica, física ou química (TOYINBO, 2019; BRICKUS; AQUINO NETO, 1999). O importante campo da Qualidade Ambiental Interna, do qual faz parte a QAI, é de grande complexidade e, além da Arquitetura, certamente extrai conhecimento de outras áreas da ciência, como: “a Engenharia, a Biologia (Fisiologia) e a Medicina”. “A menos que essas disciplinas colaborem, as informações da pesquisa científica acabam incompletas” (KARAPETSIS; ALEXANDRI, 2016, p. 03).

Portanto, a leitura atenta de outras fontes de conhecimento pode agregar valor aos estudos da qualidade do ar interior, bem como completar ou até mesmo aprofundar as conclusões de uma pesquisa científica nesta área de conhecimento.

O campo da Fisiologia Pulmonar ou Respiratória apresenta uma variedade grande de fatores geradores de doenças que podem estar relacionados à poluição do ar, e confirma a natureza multidisciplinar dos estudos da Qualidade Ambiental Interna.

O pulmão, responsável pela inspiração e expiração, é um órgão composto por duas grandes partes localizadas dentro da cavidade torácica, recobertas por uma fina membrana chamada pleura e conectados à traqueia pelos brônquios principais (BRITANNICA, 2019).

A respiração é resultado da movimentação do diafragma, que é um músculo laminar inserido na caixa torácica nas costelas inferiores. Sua contração força o conteúdo abdominal para baixo e a abertura do tórax, o que causa o aumento de volume e induz a entrada de ar, chamada inspiração (WEST, 2013). Além do diafragma, os músculos intercostais se contraem e participam do aumento de volume, este que diminui a pressão interna e que succiona o ar para o interior dos pulmões (BRITANNICA, 2019).

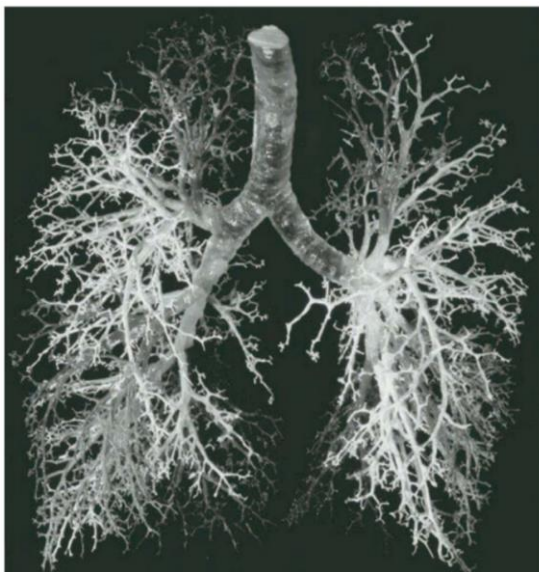
Os seres humanos, em média, respiram a uma frequência de 15 movimentos respiratórios/min quando em repouso, e nessa condição, o volume corrente é de aproximadamente 500ml. Em números, em função da quantidade de movimentos e do volume unitário, tem-se 7.500ml/min ($=500 \times 15$). Entretanto, a ventilação alveolar (que alcança os alvéolos) é próxima de 5.250ml/min porque nem todo o ar inspirado chega à região de trocas gasosas (WARD; WARD; LEACH, 2012).

A respeito da composição do sistema respiratório (Figura 57), tem-se o disposto a seguir:

"O trato respiratório superior consiste em nariz, faringe e laringe. O trato respiratório inferior [...] começa com a traqueia [...]. A traqueia bifurca-se em brônquios principais direito e esquerdo [...]. O brônquio principal direito é mais amplo, mais curto e mais vertical que o esquerdo; nesse caso, os corpos estranhos inalados penetram com mais facilidade" (WARD; WARD; LEACH, 2012, p.11).

"A traqueia se divide em brônquio principal direito e brônquio principal esquerdo, os quais, por sua vez, se dividem em brônquios lobares e, após, em brônquios segmentares. Esse processo continua até os bronquíolos terminais, que são as menores vias aéreas sem alvéolos. Todos esses brônquios formam ductos condutores. Sua função é levar o gás inspirado para as regiões pulmonares de troca gasosa (...)" (WEST, 2013, p. 4)

Figura 57 – Molde das vias aéreas dos pulmões humanos, sem os alvéolos

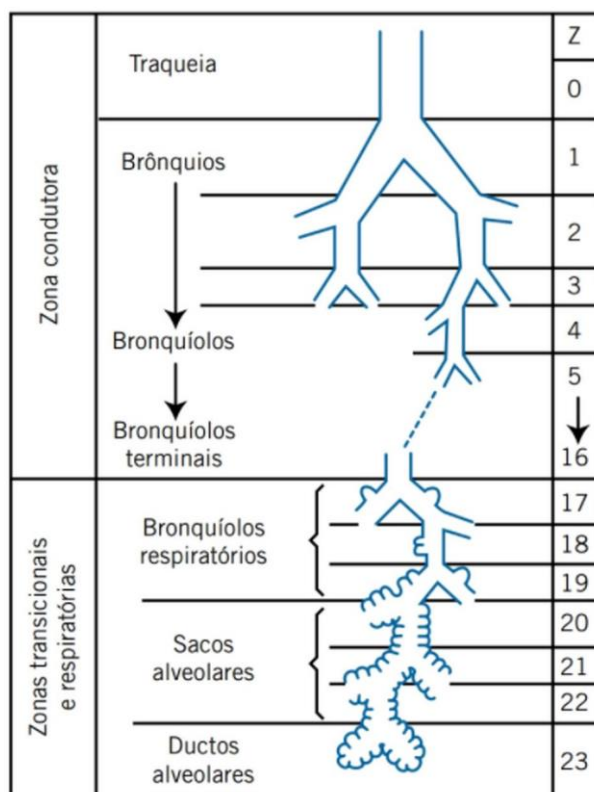


Fonte: West (2013, p.5).

A subdivisão das vias aéreas é gradativa e sucede-se repetidas vezes (chamadas "gerações"). A cada geração, as vias aproximadamente dobram de número. Nas gerações 5 a 11, estão os brônquios pequenos, cujos menores possuem cerca de 1mm de diâmetro. Já os bronquíolos começam após a geração 12, os bronquíolos terminais na geração 16, até chegarem aos bronquíolos respiratórios

(Figura 58), que é a primeira geração a conter alvéolos. Seguem-se dos ductos alveolares e os sacos alveolares na geração 23, onde as paredes são completamente compostas de alvéolos (WARD; WARD; LEACH, 2012, p.11).

Figura 58 – Subdivisão gradativa das vias aéreas humanas em gerações



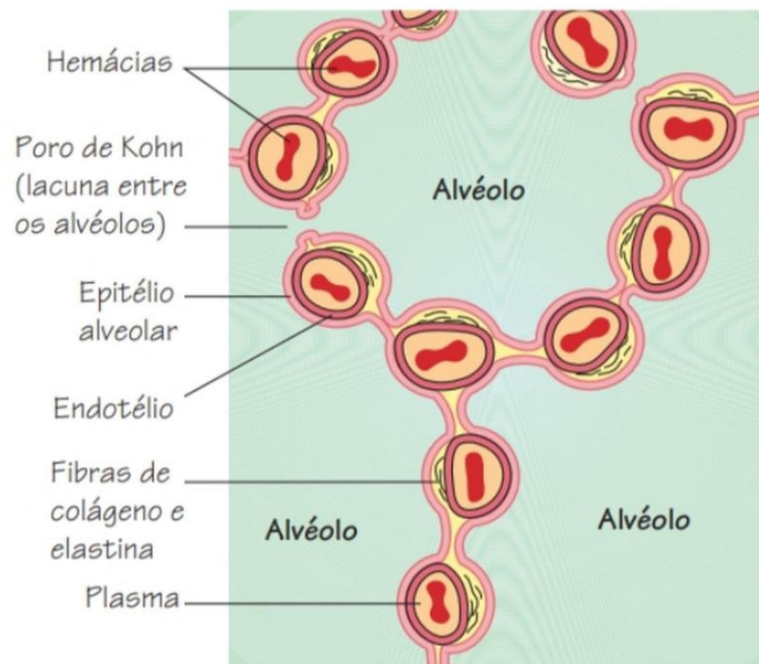
Fonte: West (2019, p. 6)

O trato respiratório superior, bem como as vias aéreas no setor que se estende até os bronquíolos terminais não participam da troca gasosa. Apesar de serem chamadas de “espaço morto anatômico”, esses componentes não são desprovidos de função, pois condicionam o ar pelo seu aquecimento, filtração e umidificação (WARD; WARD; LEACH, 2012).

A principal função do pulmão é a realização de troca gasosa, o que ocorre na membrana alvéolo-capilar. Esta troca acontece por difusão simples ou difusão passiva, ou seja, pela diferença de pressão entre duas áreas, num processo muito rápido (WEST, 2013). Apesar disso, realizam outras funções, como: expiração de água, remoção de outros gases, síntese, transformação e degradação de substâncias (BRITANNICA, 2019).

O conjunto da membrana alvéolo-capilar (Figura 59), apesar de ser muito fina, possui uma área total que varia entre 50 e 100m², que se instala na caixa torácica graças ao fato de ser formada por pequenos sacos aéreos. Envolvidos por vasos sanguíneos, estes sacos são os alvéolos, que existem no ser humano na quantidade aproximada de 500 milhões de unidades. A região alveolar possui volume de cerca de 2,5 a 3 litros (WEST, 2013).

Figura 59 – O alvéolo e a membrana alvéolo-capilar



Fonte: Ward; Ward; Leach (2012, p.18)

Apesar da enorme superfície do pulmão, uma pessoa em repouso usa cerca de um vigésimo da área disponível para troca de gases (BRITANNICA, 2019). Em atividades que exigem mais oxigênio, como o exercício, outros capilares se abrem em torno da membrana alvéolo-capilar, o que faz com que a área para difusão dos gases aumente e melhore o fornecimento de oxigênio. (WEST, 2013).

São dois estágios envolvidos na captura de oxigênio: 1) difusão por meio da membrana alvéolo-capilar e 2) reação entre o O₂ e a hemoglobina. O sangue oxigenado sai da rede capilar e se dirige às pequenas e depois às quatro grandes veias pulmonares (WEST, 2013).

Ao adentrar o eritrócito (hemácia), ocorre a combinação com a hemoglobina (Hb). O oxigênio + Hb dá origem à oxiemoglobina (HbO₂). “Capacidade

de O₂” é o termo dado à quantidade máxima deste gás que pode ser combinada à Hb, e está em torno de 20,8ml de O₂/dL de sangue (WEST, 2013).

Uma vez na corrente sanguínea, o O₂ e o CO₂ se movimentam entre o sangue e as células também através da difusão. Já o CO₂ é transportado no sangue tanto na forma de bicarbonato (cerca de 60%), como dissolvido no plasma ou até mesmo combinado a proteínas. O dióxido de carbono é cerca de 20 vezes mais solúvel no sangue do que o oxigênio. Porém, percentualmente, a maior parte dele é transportado sob a forma de bicarbonato. Com este processo, o corpo exerce controle sobre o equilíbrio ácido-básico (WEST, 2013; WARD; WARD; LEACH, 2012).

O oxigênio e o gás carbônico naturalmente fazem parte da respiração no organismo. Já outros gases, que compõem a poluição do ar, podem ser danosos à saúde e ter efeito nocivo no aparelho respiratório:

"Os óxidos de nitrogênio causam inflamação no trato respiratório superior e irritação ocular e são responsáveis pela neblina amarelada da poluição. Os óxidos de enxofre e o ozônio também promovem inflamação brônquica, e o ozônio em altas concentrações pode produzir edema pulmonar. O perigo do CO é a sua propensão a ligar-se com a hemoglobina, e os hidrocarbonetos cíclicos são potencialmente carcinogênicos. Ambos estão presentes no cigarro, os quais são inalados em concentrações muito mais elevadas do que qualquer outro poluente atmosférico. Existem evidências de que alguns poluentes agem em sinergismo, ou seja, suas ações combinadas excedem as das suas ações individuais" (WEST, 2013, p. 181).

O monóxido de carbono consegue se difundir pela membrana alvéolo-capilar com facilidade semelhante à do oxigênio. Em seguida, se liga à hemoglobina com uma ligação muito mais forte que a do O₂. Além disso, o CO permanece ligado à Hb por muito mais tempo. Isso favorece o aumento de sua quantidade no sangue, o que gradualmente deixa menos Hb disponível para sua função normal, causando hipoxemia arterial, que é a redução da concentração de oxigênio no sangue (WHO, 2010).

Os óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre e aldeídos induzem respostas como piora da asma e DPOC, irritação das mucosas, inflamação das vias aéreas, e

efeitos mais graves como dano epitelial e alveolar, podendo causar edema pulmonar. Os particulados suscitam também a inflamação nas vias aéreas e nos alvéolos e têm peso no aumento das mortes em idosos (WARD; WARD; LEACH, 2012).

Frente ao ar poluído, o pulmão possui mecanismos para lidar com as partículas inaladas. As de maior tamanho são filtradas no nariz e as menores ficam depositadas nas vias aéreas condutoras e são removidas transportadas pelo muco graças ao movimento contínuo e rítmico de milhões de minúsculos cílios (WEST, 2013).

"Muitos poluentes se encontram sob a forma de aerossol [...]. Quando o aerossol é inalado, seu destino depende do tamanho das partículas. As partículas grandes são removidas pela impactação no nariz e na faringe. [...] são incapazes de "passar as bifurcações" com rapidez em razão da inércia, batendo na mucosa molhada e sendo aprisionadas (WEST, 2013, p. 181).

Desta forma, as narinas e a nasofaringe se constituem uma barreira a partículas maiores que $10\mu\text{m}$, pela existência de pelos e muco sobre os quais se aderem (WARD; WARD; LEACH, 2012). As partículas de menor diâmetro, geralmente inferiores a $5\mu\text{m}$, conseguem ultrapassar a traqueia (WARD; WARD; LEACH, 2012):

As partículas de tamanho médio se depositam nas vias aéreas de menor calibre em função do seu peso. Isso é chamado de sedimentação e ocorre especialmente onde a velocidade do fluxo é reduzida de maneira repentina em decorrência do grande aumento das vias aéreas [...]. Por esta razão, a deposição é intensa nos bronquíolos respiratórios e terminais [...]. As partículas menores (menos de $0,1\mu\text{m}$ de diâmetro) podem alcançar os alvéolos, onde se dá alguma deposição por meio da difusão às paredes. Muitas partículas pequenas não são depositadas e são exaladas na respiração seguinte" (WEST, 2013, p. 181).

O epitélio respiratório é coberto por uma camada de 5 a $10\mu\text{m}$ de muco, que é produzido por células e glândulas especializadas. Ao capturar as impurezas, o muco é levado pelos cílios existentes sobre as células epiteliais. Eles apresentam movimento sincronizado. São necessários aproximadamente 40 minutos para o

transporte do muco desde os grandes brônquios até a faringe, porém dias ao se originarem dos bronquíolos respiratórios. A ação de poluentes, infecções e anestésicos é capaz de reduzir o transporte mucociliar (WARD; WARD; LEACH, 2012).

"Uma vez depositadas, a maioria das partículas é removida pelos vários mecanismos de depuração. As partículas depositadas nas paredes brônquicas são expelidas pelo muco e impulsionadas pelos cílios, sendo expectoradas ou deglutidas. No entanto, a ação ciliar pode ser paralisada por irritantes inalados. As partículas depositadas nos alvéolos são principalmente engolfadas por macrófagos que saem através do sangue e dos linfáticos" (WEST, 2013, p.181).

Ou seja, nos alvéolos, por não possuírem cílios, são os macrófagos que se incumbem de englobar as partículas que lá se depositam e as removerem por meio dos linfáticos e do fluxo sanguíneo. Os glóbulos brancos participam da defesa do organismo frente ao material estranho depositado (WEST, 2013).

O sistema respiratório possui receptores em diversos locais. Aqui cabe destacar a existência dos receptores irritativos, também chamados pela literatura de "receptores de distensão pulmonar de adaptação rápida". Respondem a estímulos nocivos nas paredes das vias aéreas. Acredita-se que respondam a estímulos como gases nocivos, fumaça de cigarro, poeiras e ar frio. As respostas envolvem a broncoconstrição e hiperpneia, que é o aumento da frequência da respiração. Também no sistema respiratório superior, incluindo o nariz, nasofaringe, laringe e traqueia, existem receptores que respondem à estimulação mecânica e química na forma de reflexos como espirros, tosse e broncoconstrição (WEST, 2013).

Em se tratando de microorganismos, conforme visto no item anterior, diversos tipos de bactérias, fungos, e vírus são causas típicas de doenças pulmonares, como a pneumonia (WARD; WARD; LEACH, 2012).

Mesmo com todo o aparato de defesa, os pulmões sofrem infecções e lesões, chegando a obstruir algumas partes. Determinadas inflamações podem produzir significativos danos que, após curados, apresentam-se na forma de uma cicatriz fibrosa que não mais participará das tarefas respiratórias. Muitos destes danos, infelizmente, são permanentes (BRITANNICA, 2019).

Desta forma, mesmo que o organismo humano tenha processos de defesa

contra os contaminantes, pelo fato de mesmo assim os poluentes, sejam na forma de gases, particulados ou micróbios serem capazes de ocasionar danos aos pulmões, são necessários parâmetros que permitam o controle e limite da emissão de poluentes no ar. Organismos como a OMS, por exemplo, estabelecem diretrizes, cabendo a cada país estabelecerem seus limites na forma de normas ou leis.

APÊNDICE B

Origem da instituição e breve análise da arquitetura do Ifes Campus Vitória

B.1 Origem da instituição

A Educação Profissional brasileira, ao longo de sua história, esteve atrelada ao contexto político e econômico. Em seu estágio embrionário, passou pelo Período Colonial com a escola jesuítica e, posteriormente, pela Reforma Pombalina, com a qual abandonou a vocação prioritariamente religiosa e se dedicou à aprendizagem de ofícios artesanais e manufatureiros (LIMA, 2017).

Vinda da Europa por volta da metade do século XIX, uma corrente de ideias cresce gradativamente e revela em seu apogeu na década de 1890, o positivismo: uma esperança por um futuro de desenvolvimento, paz e concórdia social (LEONÍDIO, 2007).

De acordo com esse autor:

“O Brasil [...] compartilhou, apesar de seu atraso marcante, da euforia modernizante que se introduziu no país, primeiramente, com as ideias mais modernas e avançadas da ciência europeia, sobretudo depois que a febre positivista grassou em variados setores da cultura nacional; e, num segundo momento, com a invasão das modernas invenções da tecnologia, que se alastrou pelo mundo na época que ficou conhecida pela história como *belle époque*” (LEONÍDIO, 2007, pág. 944)

No primeiro período da República, a partir de 1889, a educação brasileira recebeu fortes influências do pensamento positivista, visto que o mesmo agradava os próprios governantes, a começar pelo primeiro presidente do Brasil, o Marechal Deodoro da Fonseca (LIMA, 2017). O Positivismo, com a aposta no progresso moral e científico, era uma maneira de ordenar a nova sociedade (e a nova humanidade), mais complexa em seu contexto industrial (PORFÍRIO, 2020). O Brasil do final do século XIX e início do século XX era um terreno fértil para a ciência, cultura e tecnologia, e inúmeros acontecimentos sinalizam para suas potencialidades (SUETH *et al.*, 2009).

Envolto num contexto de mudança social, artística e científico/tecnológica, Nilo Peçanha, o presidente deste país, que à época se denominava Estados Unidos do Brasil, criou as Escolas de Aprendizes Artífices (EAAs) por meio do Decreto nº 7566/1909. As unidades se instalaram nas capitais dos Estados da República

(MEDEIROS NETA, NASCIMENTO & RODRIGUES, 2012). Eram vinculadas ao Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio.

Algumas décadas mais tarde, com o Decreto-Lei N° 4.127/1942, foram extintos “os estabelecimentos federais de ensino industrial” (Art. 9°) para serem recriados em novo formato. Desta forma, nascia a Escola Técnica de Vitória (ETV) (Art. 8°). Todo o patrimônio e infraestrutura aproveitável aos novos cursos foi transferida à nova instituição por meio deste decreto. Os funcionários antigos tiveram a garantia de serem lotados (Art. 9°, §1°, 2° e 3°). Os cursos técnicos e cursos pedagógicos passam a fazer parte ao lado dos cursos industriais e de mestria (BRASIL, 1942).

Enquanto isso, a nova sede foi inaugurada ainda em 1942 (Figuras 60 e 61), em terreno que pertenceu ao Barão de Monjardim e doado pelo Estado do Espírito Santo em 1936, com autorização do governador João Punaro Bley. “A Avenida Vitória era cortada pelos trilhos de bonde que conduziam a população entre o centro e a Praia do Canto”. (SUETH *et al.*, pág. 55, 2009).

Figura 60 - Vista da sede da ETV na década de 1940.



Fonte: Adaptada de SUETH *et al.*, 2009, pág. 56.

Figura 61 - Vista da Sede da ETV na década de 1950.



Fonte: biblioteca.ibge.gov.br (2020)

Ao longo de sua história, a instituição ainda se modificou, passando a

Escola Técnica Federal do Espírito Santo – ETFES e, posteriormente, a Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo – CEFETES. Por último, se tornou o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES. Ao longo de sua existência, o campus Vitória sofreu reformas e ampliações, porém manteve-se seu padrão arquitetônico inicial.

B.2 Breve análise da arquitetura do Ifes Campus Vitória

A maneira de Le Corbusier¹⁹ tratar as formas e as proporções era a busca pela estética da máquina, pela elementaridade geométrica (formas geométricas elementares) de leitura imediata (ZEVI, 1984). Por meio dele arquiteto, o Purismo se apresentou como uma das vertentes do Movimento Moderno na arquitetura, caracterizando-se pela aversão ao ornamento e pela apresentação do edifício em elementos claros, como volume, esquadrias, pilotis, de modo que sua arquitetura articula elementos como se fosse uma máquina (COLIN, 2011).

Figura 62 - Edifício do Ifes Campus Vitória: ao fundo, o teatro.



Fonte: o autor (2022)

Nos edifícios do Campus Vitória, seguindo uma linguagem típica do racionalismo modernista (ver Figura 62, acima), percebe-se a representação clara dos elementos (plano, volume, vazio, esquadria, etc), cada qual cumprindo sua função e sua apresentação numa linguagem pura. Além disso, há destaque para elementos, que aparecem com abundância e vigor ao longo de quase todo o edifício: os Pilotis (Figuras 63 e 64). Um dos “cinco pontos” da arquitetura de Le Corbusier (FRAMPTON, 1997), esse elementos proporcionam integração e aproveitamento de espaços, como

¹⁹ Le Corbusier (1887-1965) foi um arquiteto franco-suíço. Desenvolveu os princípios dos cinco pontos da arquitetura moderna (FEIDEN; MELLO, 2021).

também a liberação da área do térreo para uso comum e convivência social.

A estética do Purismo buscou valorizar a racionalidade técnica, a aplicação funcional dos materiais (verdade dos materiais), a simplicidade formal. Por isso, o vocabulário maquinista apresentava novo repertório de elementos utilizados de maneira racional, rejeitando-se o uso de ornamentos.

Figura 63 - Edifício do Ifes Campus Vitória: jardim, pátio e biblioteca



Fonte: autor (2022)

Figura 64 - Uso dos pilotis no Campus Vitória, do Ifes (a) pátio central visto do jardim (b) pátio central visto de dentro

a)



b)



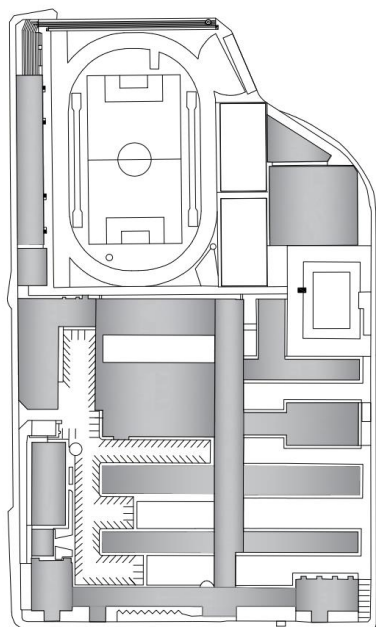
Fonte: o autor (2022)

A implantação dos blocos do Ifes Campus Vitória, de forma semelhante à estética o projeto de Van den Broek em Bakema para a Universidade Bochum, na Alemanha, possui articulação complexa entre os blocos racionalistas, como também a lógica organizacional dos sistemas neoplasticistas (MONTANER, 2001). Além disso, o projeto atual do Ifes parte de uma linha central e da organização assimétrica (quase simétrica) dos blocos, apesar de perceptível em imagens aéreas e em planta.

A organização do edifício (ou dos edifícios) do Ifes seguindo um plano ortogonal, localiza e destaca a hierarquia do pátio central longitudinal (eixo vertical), colocando-o como ponto de encontro social (Figura 65). Dele parte, bilateralmente e ortogonalmente, os blocos de salas de aula, laboratórios, oficinas, ambientes administrativos, biblioteca, entre outros. Esta composição se dá a partir de uma atitude racionalista formalista, onde impera a forma geométrica pura e os eixos ordenadores.

Figura 65 – a) Planta de Implantação do Campus Vitória.

b) Imagem aérea.



Fonte: a) o autor (2022); b) adaptado do Googlemaps (2020)

A Carta de Atenas, produto do 4º Congresso Internacional de Arquitetura Moderna – CIAM, valoriza, também numa lógica racionalista funcionalista, o aproveitamento da luz solar, da vegetação e do espaço como matérias-primas do urbanismo. Ao hierarquizar os espaços segundo seus usos (habitação, trabalho, lazer

e circulação), separa sob medida os elementos no cumprimento de seu papel, para formar o todo, a cidade (LE CORBUSIER, Carta de Atenas, 1933).

Pode-se fazer uma analogia com os espaços do Ifes, organizados em locais de permanência e trabalho, locais de convívio social e espaços de circulação e de lazer, representados como elementos completamente distintos e claramente identificáveis nos volumes, *halls*, pilotis e pátios abertos.

A maneira de organização dos pátios entre blocos, apesar de interconectados tanto no funcionamento do fluxo como visualmente, definem agrupamentos menores, permitindo maior contato com a vegetação e espaços abertos. Estes pátios formam locais propícios de serem percorridos a pé, mais próximos da escala humana, apesar de estarem inseridos num campus múltiplas vezes maior. Este esquema, guardadas as devidas proporções, pode ser remetido à experiência com unidades de vizinhança em Radburn, New Jersey, e seus espaços abertos menores, adequados à vida comunitária e permeados pela vegetação, cujo projeto é de autoria de Clarence Stein e Henry Wright (MONTANER,2001).

As unidades funcionam como um recorte menor dentro da cidade, assim como os espaços livres dos pátios, em comunicação com os espaços abertos e em sua forma repetitiva, também funcionam como unidades menores dentro do campus.

Outra peculiaridade é a estrutura do edifício feita em concreto armado, tecnologia que predominava no Brasil e na arquitetura moderna, tanto pelo baixo custo e maior facilidade de obtenção de mão de obra quanto pela formação dos engenheiros brasileiros. A estrutura independente permite a liberação das paredes, que passam a ter função de vedação, fato que ocorre também nas edificações do Ifes e que permitem a organização livre das divisórias em relação à localização dos apoios.

APÊNDICE C

Análise Estatística

D.1 Análise dos dados de monitoramentos

Para a análise dos dados, utilizou-se a regressão linear múltipla. O modelo considerado para a sala E5 foi:

$$\text{Pol}_t = a_0 + a_1 \cdot \text{Pol}_{t-1} + a_2 \cdot \text{Pol}_{t,\text{Ex}} + a_3 \cdot \text{Oc}_t + a_4 \cdot \text{Ab}_{t,\text{porta}} + a_5 \cdot \text{Ab}_{t,\text{janela}} + a_6 \cdot (\text{Oc}_t \cdot \text{Ab}_{t,\text{porta}}) + a_7 \cdot (\text{Oc}_t \cdot \text{Ab}_{t,\text{janela}}) + e_t,$$

Enquanto que, para a sala H4, foi:

$$\text{Pol}_t = (a_0 + a_0^*) + (a_1 + a_1^*) \cdot \text{Pol}_{t-1} + (a_2 + a_2^*) \cdot \text{Pol}_{t,\text{Ex}} + (a_3 + a_3^*) \cdot \text{Oc}_t + (a_4 + a_4^*) \cdot \text{Ab}_{t,\text{porta}} + (a_5 + a_5^*) \cdot \text{Ab}_{t,\text{janela}} + (a_6 + a_6^*) \cdot (\text{Oc}_t \cdot \text{Ab}_{t,\text{porta}}) + (a_7 + a_7^*) \cdot (\text{Oc}_t \cdot \text{Ab}_{t,\text{janela}}) + e_t^*,$$

Pol_t denota o nível do poluente ($\text{MP}_{2,5}$, MP_{10} , CO_2) no instante t , Oc_t denota a ocupação da sala no instante t , $\text{Pol}_{t,\text{Ex}}$ denota o nível do poluente no ambiente externo no instante t , $\text{Ab}_{t,\text{porta}}$ e $\text{Ab}_{t,\text{janela}}$ denotam as aberturas (em m^2) de portas e janelas no instante t , respectivamente, e_t e e_t^* são termos de erro aleatório e a_i^* denota o efeito da sala H4 no coeficiente a_i (a sala E5 foi utilizada como nível de referência).

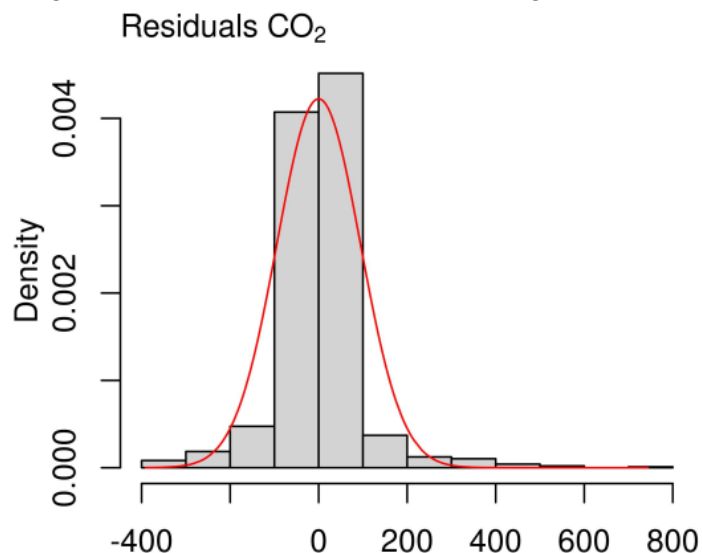
Os modelos acima consideram interações entre as aberturas de portas e janelas no efeito da ocupação. Por exemplo, para a sala E5, supondo que $a_6 < 0$, quando a porta está aberta ($\text{Ab}_{t,\text{porta}} > 0$), tem-se que o efeito da ocupação passa a ser $a_2 + a_6 < a_2$, ou seja, nesse cenário, o fato de a porta estar aberta causa uma redução do efeito da ocupação no nível observado do poluente.

Os parâmetros foram estimados via máxima verossimilhança (gaussiana), isto é, para a estimação dos parâmetros, está sendo assumido que $e_t \sim N(0, \sigma^2)$ e $e_t^* \sim N(0, \sigma^{2*})$. Foram realizados os testes de hipóteses ANOVA e *t-student*. Adiante, será visto que os resíduos não passaram no teste de normalidade (Shapiro-Wilks). Portanto, foi utilizada a técnica para obtenção de *p*-valores corrigidos para ambos os testes. Tanto para a ANOVA quanto para o teste *t-student*, as reamostras *bootstrap* foram construídas sob a hipótese nula correspondente a cada teste. Para maiores detalhes, veja Efron (1979) e Ter Braak (1992).

D.1.1 Resultados

Após aplicar a análise de regressão, obteve-se os resíduos, cujo histograma é apresentado na Figura 66 a seguir, juntamente com a densidade normal coma respectiva média e desvio-padrão (linha em vermelho). Fica claro que o modelo normal não parece se adequar bem aos resíduos, o que é confirmado pelo teste de Shapiro-Wilks, que rejeita a normalidade (p -valor $< 10^{-16}$).

Figura 66 - Histograma dos resíduos do modelo de regressão para os dados de CO₂



Fonte: o autor (2022)

Devido à confirmação de não normalidade, foi empregada a metodologia *bootstrap* para obtenção de p -valores corrigidos. Para efeito de comparação, os p -valores gaussianos também são apresentados. Os resultados relativos à significância dos coeficientes (teste *t-student*) são apresentados na Tabela 11, a seguir.

Tabela 11 – Estimativas dos coeficientes e respectivos p -valores do teste *t-student* para os dados de CO₂

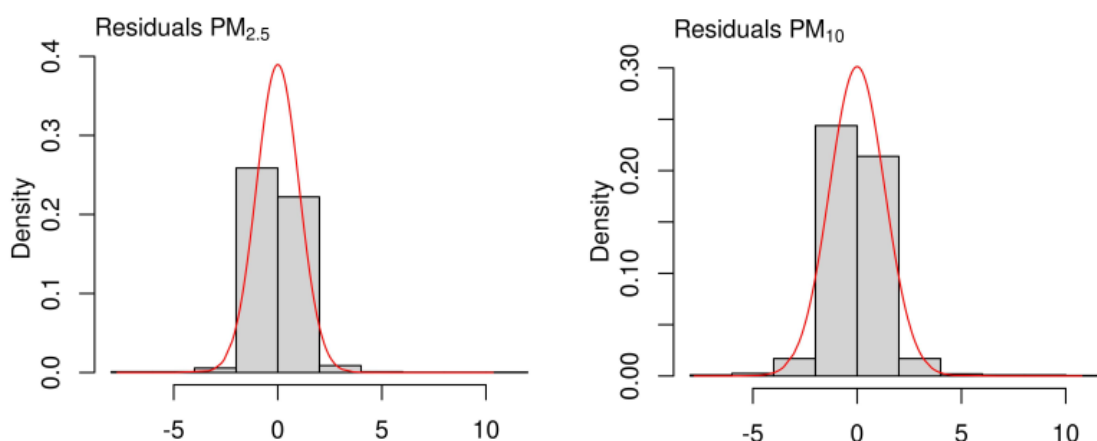
Parameter	Estimate	Gaussian	Bootstrap
Intercept(a_0)	159.3955	0.1398	0.1500
Pol _{t-1} (a_1)	0.8161	0.0000	0.0005
Pol _{t,Ex} (a_2)	-0.2134	0.3801	0.3140
Oc _t (a_3)	16.5962	0.0000	0.0005
Ab _{t,porta} (a_4)	1.9940	0.7570	0.7680
Ab _{t,janela} (a_5)	-0.3446	0.8482	0.9770
Oc _t ·Ab _{t,porta} (a_6)	-5.4624	0.0000	0.0005
Oc _t ·Ab _{t,janela} (a_7)	-1.0283	0.0000	0.0005
Sala(a^*_0)	17.1475	0.9114	0.8875
Sala·Pol _{t-1} (a^*_1)	-0.2281	0.0000	0.0005

$Sala \cdot Pol_{t,Ex}(a^*_2)$	0.1795	0.6107	0.5345
$Sala \cdot Oc_t(a^*_3)$	16.4573	0.0000	0.0005
$Sala \cdot Ab_{t,porta}(a^*_4)$	0.7553	0.9405	0.9395
$Sala \cdot Ab_{t,janela}(a^*_5)$	0.7716	0.8852	0.9095
$Sala \cdot Oc_t \cdot Ab_{t,porta}(a^*_6)$	-8.9045	0.0000	0.0005
$Sala \cdot Oc_t \cdot Ab_{t,janela}(a^*_7)$	-0.1518	0.8770	0.8790

Fonte: o autor (2022)

Procedimento semelhante foi realizado para o $MP_{2,5}$ e MP_{10} . Após aplicar-se a análise de regressão, obteve-se resíduos cujo histogramas são apresentados na Figura 67, como também a densidade normal com a respectiva média e desvio-padrão (em vermelho). O modelo normal não se adequou bem, com confirmação dada pelo teste de Shapiro-Wilks.

Figura 67 - Histograma do modelo de regressão para os dados de $MP_{2,5}$ e MP_{10}



Fonte: o autor (2022)

Devido à confirmação de não normalidade, empregou-se a metodologia *bootstrap* para obtenção de p -valores corrigidos. Para efeito de comparação, os p -valores gaussianos também são apresentados. Os resultados relativos à significância dos coeficientes (teste *t-student*) são apresentados nas tabelas 2 e 3 a seguir. Os valores em negrito indicam discordâncias entre os p -valores gaussiano e *bootstrap*, sendo adotado o último. As duas tabelas (12 e 13) apresentam as estimativas para $MP_{2,5}$ e MP_{10} , nessa ordem.

Tabela 12 – Estimativas dos coeficientes e respectivos p -valores do teste

t-student para os dados de MP_{2,5}

Parameter	Estimate	Gaussian	Bootstrap
Intercept(a_0)	0.4873	0.0119	0.0025
Pol _{t-1} (a_1)	0.7006	0.0000	0.0005
Pol _{t,Ex} (a_2)	0.1202	0.0000	0.0005
Oc _t (a_3)	-0.0296	0.0226	0.0060
Ab _{t,porta} (a_4)	-0.0192	0.7796	0.7200
Ab _{t,janela} (a_5)	-0.0425	0.0251	0.0110
Oc _t ·Ab _{t,porta} (a_6)	0.0065	0.3737	0.2610
Oc _t ·Ab _{t,janela} (a_7)	0.0036	0.0930	0.0470
Sala(a^*_0)	0.1471	0.5829	0.6120
Sala·Pol _{t-1} (a^*_1)	-0.0449	0.2939	0.3345
Sala·Pol _{t,Ex} (a^*_2)	0.0332	0.2280	0.2605
Sala·Oc _t (a^*_3)	0.0113	0.6388	0.6785
Sala·Ab _{t,porta} (a^*_4)	0.0401	0.7135	0.7145
Sala·Ab _{t,janela} (a^*_5)	0.0234	0.6746	0.7330
Sala·Oc _t ·Ab _{t,porta} (a^*_6)	0.0145	0.3840	0.4905
Sala·Oc _t ·Ab _{t,janela} (a^*_7)	-0.0054	0.6105	0.6660

Fonte: o autor (2022)

Tabela 13 - Estimativas dos coeficientes e respectivos p -valores do teste t -student para os dados de MP₁₀

Parameter	Estimate	Gaussian	Bootstrap
Intercept(a_0)	0.5467	0.0351	0.0155
Pol _{t-1} (a_1)	0.6797	0.0000	0.0005
Pol _{t,Ex} (a_2)	0.1669	0.0000	0.0005
Oc _t (a_3)	-0.0408	0.0153	0.0095
Ab _{t,porta} (a_4)	-0.0251	0.7769	0.7295
Ab _{t,janela} (a_5)	-0.0568	0.0208	0.0110
Oc _t ·Ab _{t,porta} (a_6)	0.0098	0.3024	0.2600
Oc _t ·Ab _{t,janela} (a_7)	0.0042	0.1325	0.0845
Sala(a^*_0)	-0.0032	0.9929	0.9890
Sala·Pol _{t-1} (a^*_1)	-0.0342	0.3946	0.4240
Sala·Pol _{t,Ex} (a^*_2)	0.0568	0.0462	0.0900
Sala·Oc _t (a^*_3)	0.0091	0.7702	0.7815
Sala·Ab _{t,porta} (a^*_4)	0.0660	0.6398	0.6445
Sala·Ab _{t,janela} (a^*_5)	0.0131	0.8559	0.8670
Sala·Oc _t ·Ab _{t,porta} (a^*_6)	0.0116	0.5902	0.6440
Sala·Oc _t ·Ab _{t,janela} (a^*_7)	0.0019	0.8892	0.9025

Fonte: o autor (2022)

D.2 – Análise dos Questionários

Para o questionário 1, primeiramente, fez-se uma análise descritiva dos dados. Em seguida, com o intuito de identificar evidências de associação das variáveis que influenciem as avaliações dos alunos, construiu-se tabelas de contingência e, posteriormente, realizou-se o teste de independência de qui-quadrado.

Um modelo de regressão ordinal foi utilizado para descrever relações entre as variáveis e prever as respostas em função da influência das concentrações registradas.

D.2.1 – Regressão ordinal

A regressão ordinal é uma técnica pertencente à família de análises de regressão, com intuito preditivo (HARREL, 2001). Descreve dados, além de explicar a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. O objetivo foi realizar uma modelagem para entender que fatores possuem influência sobre a avaliação dos alunos a respeito da qualidade do ar.

Para tanto, com objetivo de mensurar o efeito das concentrações de poluentes sobre as respostas, calcularam-se médias de CO₂, de MP_{2,5} e MP₁₀ em diferentes períodos (2 horas, 1 hora, 30 minutos, 20 minutos e 10 minutos) anteriores ao instante da aplicação do questionário, e o período que melhor contribuiu no ajuste do modelo foi o de 1 hora. Considerou-se também a temperatura do ambiente no momento da avaliação dos alunos.

Buscou-se ajustar o modelo de forma que permitisse associar eficiência, interpretabilidade e capacidade de generalização, com base ainda na porcentagem de acerto das previsões e no Critério de Informação de Akaike (AIC). Para obter-se ajuste satisfatório, recategorizou-se a variável resposta (qualidade do ar) para três opções: boa, normal e ruim. Da mesma forma, agrupou-se a covariável sensação térmica em três categorias: com calor, neutro e com frio.

D.2.1.1 Definição do modelo

Seja Y a variável ordinal com J categorias. Então $P(Y \leq j)$ é a probabilidade cumulativa de Y menor ou igual a uma categoria específica $j = 1, \dots, J - 1$. As chances de ser menor ou igual a uma determinada categoria podem ser definidas como:

$$\frac{P(Y \leq j)}{P(Y > j)}$$

Trabalhou-se e modelou-se o log das probabilidades, de modo que:

$$\log \left(\frac{P(Y \leq j)}{P(Y > j)} \right) = \log \left(\frac{P(Y \leq j)}{1 - P(Y \leq j)} \right) = \text{logit}(P(Y \leq j))$$

O modelo de regressão ordinal é definido como:

$$\text{logit}(P(Y \leq j)) = \beta_{0j} + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p$$

No R, onde foi realizado toda a análise dos dados, o modelo é parametrizado como:

$$\text{logit}(P(Y \leq j)) = \beta_{0j} - \eta_1 x_1 - \cdots - \eta_p x_p$$

com:

$$\eta_i = -\beta_i$$

D.2.1.2 – Interpretação dos coeficientes

A partir da definição do modelo, percebe-se que:

$$\begin{aligned} \text{logit}(P(Y \leq j)|x_1 = 1) - \text{logit}(P(Y \leq j)|x_1 = 0) &= \\ (\beta_{0j} - \eta_1 \times 1 - \cdots - \eta_p x_p) - (\beta_{0j} - \eta_1 \times 0 - \cdots - \eta_p x_p) \end{aligned}$$

logo:

$$\text{logit}(P(Y \leq j)|x_1 = 1) - \text{logit}(P(Y \leq j)|x_1 = 0) = -\eta_1$$

Utilizando-se a propriedade $\log(a) - \log(b) = \log(a/b)$, tem-se:

$$\begin{aligned} \log \left(\frac{\frac{P(Y \leq j|x=1)}{P(Y > j|x=1)}}{\frac{P(Y \leq j|x=0)}{P(Y > j|x=0)}} \right) &= -\eta_1 \\ \exp \left\{ \log \left(\frac{\frac{P(Y \leq j|x=1)}{P(Y > j|x=1)}}{\frac{P(Y \leq j|x=0)}{P(Y > j|x=0)}} \right) \right\} &= \exp\{-\eta_1\} \\ \frac{\frac{P(Y \leq j|x=1)}{P(Y > j|x=1)}}{\frac{P(Y \leq j|x=0)}{P(Y > j|x=0)}} &= \exp\{-\eta_1\} \end{aligned}$$

Portanto, tem-se a razão de chances de pertencer à uma categoria j ou

inferior. Como $\exp(-\eta) = \frac{1}{\exp(\eta)}$, então:

$$\exp\{\eta_1\} = \frac{\frac{P(Y > j|x=1)}{P(Y \leq j|x=1)}}{\frac{P(Y > j|x=0)}{P(Y \leq j|x=0)}}$$

A expressão acima determina a razão de chances de pertencer à uma categoria superior j , que corresponde a avaliar melhor a qualidade do ar. Os resultados do modelo são apresentados abaixo, na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados do modelo

Parâmetro	Estimativa (η_i)	Exp (η_i)
MP _{2,5} (média de 1h)	0,7081	2,0301
MP ₁₀ (média de 1h)	-0,3627	0,6957
CO ₂ (média de 1h)	0,0005	1,0005
Masculino	0,8487	2,33679
H4	-1,5172	0,2193
Você sente que a qualidade do ar está aceitável? (Sim)	3,3082	27,3367
Como se sente na sala (Frio)	0,7398	2,0956
Como se sente na sala (Neutro)	0,4954	1,6411
Está vestindo uma blusa de frio ou jaqueta (Sim)	0,70379	2,0214

Fonte: o autor (2022)

ANEXO 1

Questionários aplicados nas salas de aula em períodos de ocupação

Questionário 1 (adaptado de Haddad *et al.* (2021)):

1. Neste momento, na sala de aula, você se sente:



() Com muito frio

() Com frio

() Com pouco frio

() Neutro

() Com pouco calor

() Com calor

() Com muito calor

2. Neste momento, você prefere que a temperatura da sala esteja:



() Mais fresco

() Do jeito que está



() Mais quente

3. Neste momento, você sente que a temperatura da sala está confortável?



() Sim



() Não

4. Neste momento, você está vestindo uma blusa de frio ou jaqueta?

() Sim

() Não

5. Neste momento, você se sente cansado (a)?



() Com muito sono e () Com um pouco de () Sem sono e

cansaço

sono e cansaço

cansaço

6. **Neste momento**, como você descreveria o movimento de ar na sua sala de aula?

() Parado () Leve () Movimentado

7. **Neste momento**, você sente que a qualidade do ar desta sala de aula está aceitável?



() Sim



() Não

8. **Neste momento**, como você caracterizaria a qualidade do ar desta sala de aula?

() Muito boa () Boa () Normal () Ruim () Muito ruim

9. O que você fez durante o último intervalo?

() Corri () Caminhei () Relaxei () Me alimentei () Li ou escrevi

Muito obrigado!



Questionário 2 (adaptado de Haddad *et al.* (2021)):

1. Como você caracteriza sua condição de saúde?

() Muito boa () Boa () Normal () Ruim () Muito ruim

2. Você sofre de alguma doença?

() Sim () Não

Se concordar, especifique: _____

3. Você tem alguma alergia?

() Sim () Não

Se concordar, especifique: _____

4. Quem é responsável por ajustar a temperatura da sala de aula?

() Diretoria da escola;
() Professores;

- (☐) Trabalhador da manutenção;
- (☐) Estudantes;
- (☐) Não sei ao certo.

5. Dentre os itens a seguir, qual ou quais você ajustaria na sala de aula?

Marque todas as alternativas que se aplicam:

- (☐) Janelas;
- (☐) Porta;
- (☐) Ar condicionado;
- (☐) Nenhum;
- (☐) Outro. Por favor, especifique: _____

6. Se você respondeu que ajustaria algum dos itens anteriores, qual seria a principal razão para fazer isso?

- (☐) Porque eu sinto calor ou frio durante as aulas;
- (☐) Porque meu professor ou colegas se sentem com calor ou com frio durante as aulas;
- (☐) Porque a sala de aula fica com o ar saturado e precisa de ar fresco;
- (☐) Outro. Por favor, especifique: _____

7. Se você abre ou fecha as janelas da sala de aula, com que frequência faz isso?

- (☐) Nunca;
- (☐) Raramente;
- (☐) Algumas vezes, quando necessário;
- (☐) Com alguma frequência;
- (☐) Sempre;

8. Se você controla o ar condicionado da sala de aula, com que frequência faz isso?

- (☐) Nunca;
- (☐) Raramente;
- (☐) Algumas vezes, quando necessário;
- (☐) Com alguma frequência;
- (☐) Sempre;

9. Se você não usa nenhum dos elementos da sala de aula [janelas, porta, ventilador (se houver) ou ar condicionado], quais são os principais motivos?

Marque mais de uma alternativa, se julgar apropriado.

Para janelas e portas:

- (☐) Barulho externo;
- (☐) Segurança;
- (☐) Vento forte poderia espalhar os papéis;
- (☐) Acesso limitado à utilização das janelas;
- (☐) Não julgo necessário;

() Outro motivo. Por favor, especifique: _____

Para ar condicionado:

() Acesso limitado ao termômetro e controle remoto;

() Não julgo necessário;

() Outro motivo. Por favor, especifique: _____

10. Por quanto tempo seu desconforto térmico permanece quando ocorre durante as aulas?

Por favor, estime o tempo em minutos e/ou horas: _____

11. Quando a sala de aula fica fria ou quente?

Minha sala de aula fica **fria** principalmente:

() De manhã;

() Ao meio dia ou próximo ao meio dia;

() À tarde;

() Em nenhum momento específico;

() Em outro momento. Por favor, especifique: _____

Minha sala de aula fica **quente** principalmente:

() De manhã;

() Ao meio dia ou próximo ao meio dia;

() À tarde;

() Em nenhum momento específico;

() Em outro momento. Por favor, especifique: _____

12. Quando a sala de aula fica fria ou quente, que tipo de ajuste você faz primeiro?

() Abertura/fechamento de janelas;

() Abertura/fechamento de portas;

() Liga/desliga o ar condicionado;

() Veste/retira blusa de frio ou jaqueta;

() Outra opção. Por favor, especifique: _____

13. Como você avalia a condição geral da qualidade do ar em sua sala de aula?

() Muito boa

() Boa

() Normal

() Ruim

() Muito ruim

Muito obrigado!



