

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEATRICE TALITA RODRIGUES

MONITORAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO USANDO O SENSOR ÓTICO
SDS011 E O BIOINDICADOR *Tradescantia* sp. clone 4430 EM CURITIBA

CURITIBA

2021

LEATRICE TALITA RODRIGUES

MONITORAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO USANDO SENSOR ÓTICO
SDS011 E O BIOINDICADOR *Tradescantia* sp. clone 4430 EM CURITIBA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Emílio Graciliano Ferreira Mercuri, D.Sc.

Coorientadora: Profa. Dra. Viviane Fernandes de Souza.

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

R696m Rodrigues, Leatrice Talita
Monitoramento de material particulado usando o sensor ótico
SDS011 e o bioindicador *Tradescantia* sp. clone 4430 em Curitiba
[recurso eletrônico] / Leatrice Talita Rodrigues – Curitiba: 2021.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Emílio Graciliano Ferreira Mercuri, D.Sc
Coorientadora: Profa. Dra. Viviane Fernandes de Souza

1. Marcadores biológicos. 2. Material particulado. 3. Detectores
óticos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mercuri, Emílio
Graciliano Ferreira. III. Souza, Viviane Fernandes de. IV. Título

CDD.681.25



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
AMBIENTAL - 40001016075P3

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LEATRICE TALITA RODRIGUES** intitulada: **Monitoramento de material particulado usando o sensor ótico SDS011 e o bioindicador Tradescantia sp. clone 4430 em Curitiba**, sob orientação do Prof. Dr. EMILIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 17 de Setembro de 2021.

Assinatura Eletrônica

18/09/2021 13:41:14.0

EMILIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

20/09/2021 09:20:45.0

MARCELO PEDROSA GOMES

Avaliador Externo (DEPARTAMENTO DE BOTÂNICA)

Assinatura Eletrônica

17/09/2021 19:08:14.0

MARCELO RISSO ERRERA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico esta dissertação aos meus pais, meus maiores e melhores orientadores na vida e minha irmã, pela sua mais sincera amizade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais e irmã, que sempre me incentivaram e ajudaram nos momentos difíceis. Estiveram presentes, mesmo diante da adversidade enfrentada neste último ano.

Ao professor Emílio Graciliano Ferreira Mercuri, meu orientador, por sua dedicação, paciência e ensinamentos ao longo desta jornada, sem sua orientação seria impossível ter chego até aqui. Obrigada por topar em se aventurar no mundo dos bioindicadores e da *Tradescantia*, foi muito significativo para mim.

A professora Viviane Fernandes de Souza, minha coorientadora, por me introduzir no estudo do biomonitoramento ambiental e compartilhar comigo seu conhecimento sobre o assunto, agradeço por sua dedicação, mesmo de longe, mas sempre presente. E por fim, por conceder algumas mudas da *Tradescantia* sp. clone 4430 para que fosse possível a realização deste trabalho.

Aos professores Marcelo Risso Errera e Marcelo Pedrosa Gomes, por aceitarem participar da banca e por acrescentarem importantes contribuições para o trabalho, foi um privilégio tê-los como banca e adquirir novos conhecimentos através de suas arguições.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudo durante a execução deste projeto.

A Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, pela estrutura e oportunidade ofertada para que este trabalho fosse desenvolvido. Aos demais professores do PPGEA, por compartilharem seus conhecimentos e experiências, que com certeza foram um incentivo para a realização e conclusão deste trabalho. A secretaria do programa, em especial ao Leonildo, uma pessoa muito querida, sempre dedicado e pronto para atender e ajudar em qualquer situação.

Aos meus amigos e colegas do PPGEA, que me apoiaram e incentivaram durante toda a pesquisa. Quero agradecer em especial ao Nathan, Luiza, Lucas, André Diniz, Rafael, Denner e Andrei, que sempre estavam dispostos e presentes para ajudar, seja através de ações ou palavras, mas que contribuiram grandemente para a realização desta pesquisa.

Agradeço também a Isadora, que me ajudou no começo das análises da *Tradescantia* sp. clone 4430 em laboratório e também por toda a ajuda durante o trabalho. Agradeço a todos que gentilmente ofereceram e aceitaram em abrir as portas de suas casas para que pudessemos instalar os sensores de material particulado e os vasos com a *Tradescantia* sp. clone 4430.

Obrigada por dedicarem seu tempo em cuidar das plantas e também por realizarem as coletas das flores e me entregarem para que eu pudesse fazer as análises. Sem essa dedicação de vocês não seria possível a realização deste trabalho. Obrigada também ao professor Jean Vitule, por ter cedido um espaço no seu laboratório de ecologia e conservação (LEC) na UFPR, para que pudéssemos instalar os sensores e os vasos com as plantas.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho. Muito obrigada!

“É o meu desejo mais sério que alguns de vocês continuem a fazer o trabalho científico e mantenham a ambição e a determinação de fazer uma contribuição permanente para a ciência”.

Marie Curie

RESUMO

A concentração de gases e partículas presentes na atmosfera terrestre estão em constante mudança e podemos observar isso através de vários estudos feitos ao longo dos anos. A crescente industrialização nos centros urbanos e o aumento da frota veicular são um dos muitos fatores que impactam nessa mudança, através das emissões de gases e particulados da queima de seus combustíveis. Percebendo a importância de mensurar estes poluentes é que foram elaboradas legislações para determinar limites máximos de concentrações de determinados poluentes. Portanto, realizar o monitoramento e a quantificação destes se faz tão importante, principalmente para o meio ambiente e a saúde pública. Redes de monitoramento são essenciais para o cumprimento da legislação, porém, seu alto custo impossibilita a instalação em vários locais, por isso deve-se buscar alternativas mais acessíveis para monitorar a qualidade do ar. Sensores óticos e de baixo custo têm se mostrado como uma boa alternativa para este fim, devido a sua fácil operacionalização. Outra alternativa é biomonitoramento ambiental com o uso de bioindicadores, que apresentam sensibilidade às alterações do ambiente, fácil instalação e interpretação dos resultados. Aliar o monitoramento físico com o biológico, torna-se uma importante ferramenta para o acompanhamento da qualidade do ar, pois verifica-se se a legislação está sendo atendida e se a presença dos poluentes pode trazer algum malefício para o ecossistema. Desta forma, este trabalho usou o sensor ótico SDS011 para medir as concentrações de material particulado em Curitiba e Araucária e o bioindicador *Tradescantia* sp. clone 4430 através do bioensaio Trad-SHM, para verificar a mutagenicidade ambiental deste poluente. Os sensores e os vasos com as plantas foram distribuídos em oito pontos (sete em Curitiba e um em Araucária), e as análises ocorreram no período de janeiro de 2020 a fevereiro de 2021. O controle negativo foi realizado em um bairro de Curitiba, onde as plantas e o sensor ficaram em local isolado do ambiente externo com o uso de papel filtro. Os resultados de medições de material particulado para os pontos de monitoramento, atenderam em grande parte os limites especificados no CONAMA 491/2018, sendo que por 19 dias ficaram acima do limite para o material particulado $MP_{10}\mu g/m^3$ e 47 dias para o $MP_{2.5}\mu g/m^3$. O bioensaio Trad-SHM mostrou sensibilidade durante a exposição em campo, com frequências de mutação em pelo estaminal em todos os pontos de monitoramento. A média das correlações de Spearman (r) entre material particulado e frequência de mutação ficou em $0,45 \pm 0,21$ (correlação moderada). A continuidade de biomonitoramento se torna importante para o acompanhamento da presença de poluentes no ar, pois estes ainda são capazes de causar efeitos mutagênicos nos bioindicadores e o uso do sensor SDS011 se mostrou como uma boa alternativa para o monitoramento de material particulado.

Palavras-chave: Material particulado. Sensor de baixo custo. Biomonitoramento. *Tradescantia* sp. clone 4430.

ABSTRACT

The concentration of gases and particles present in the Earth's atmosphere is constantly changing and we can observe this through several studies carried out over the years. The growing industrialization in urban centers and the increase in the vehicle fleet are one of the many factors that impact this change, through the emissions of gases and particulates from the burning of their fuels. Realizing the importance of measuring these pollutants is that legislation was drawn up to determine maximum limits of concentrations of certain pollutants. Therefore, monitoring and quantifying these is so important, especially for the environment and public health. Monitoring networks are essential for complying with legislation, however, their high cost makes it impossible to install them in several places, so more accessible alternatives for monitoring air quality should be sought. Optical and low-cost sensors have proved to be a good alternative for this purpose, due to their easy operation. Another alternative is environmental biomonitoring with the use of bioindicators, which show sensitivity to changes in the environment, easy installation and interpretation of results. Combining physical and biological monitoring becomes an important tool for monitoring air quality, as it is verified whether the legislation is being complied with and whether the presence of pollutants can harm the ecosystem. Thus, this work used the optical sensor SDS011 to measure the concentrations of particulate matter in Curitiba and Araucária and the bioindicator *Tradescantia* sp. clone 4430 through the Trad-SHM bioassay to verify the environmental mutagenicity of this pollutant. The sensors and pots with the plants were distributed at eight points (seven in Curitiba and one in Araucaria), and the analyzes took place from January 2020 to February 2021. The negative control was carried out in a district of Curitiba, where the plants and the sensor were kept in a place isolated from the external environment using filter paper. The results of particulate material measurements for the monitoring points largely complied with the limits specified in CONAMA 491/2018, and for 19 days they were above the limit for particulate matter $PM_{10}\mu g/m^3$ and 47 days for $PM_{2.5}\mu g/m^3$. The Trad-SHM bioassay showed sensitivity during field exposure, with mutation frequencies in stem hair at all monitoring points. The mean of Spearman correlations (r) between particulate matter and mutation frequency was $0,45 \pm 0,21$ (moderate correlation). The continuity of biomonitoring becomes important for monitoring the presence of pollutants in the air, as they are still capable of causing mutagenic effects on bioindicators and the use of the SDS011 sensor proved to be a good alternative for monitoring particulate matter.

Keywords: Particulate matter. Low-cost sensor. Biomonitoring. *Tradescantia* sp. clone 4430.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organização da pesquisa	22
Figura 2 – Processo de poluição do ar	23
Figura 3 – Tempo de residência dos poluentes na atmosfera	25
Figura 4 – Faixa de diâmetro de algumas partículas encontradas no ar	26
Figura 5 – Diagrama representativo dos diferentes tipos de mecanismos de deposição das partículas.....	32
Figura 6 – Representação da inalação do MP com tamanhos de diâmetros diferentes e sua localização no corpo humano	32
Figura 7 – Remoção mensal de poluentes pelas árvores na Filadélfia-EUA.....	34
Figura 8 – Distribuição das estações em Curitiba e Região Metropolitana.....	38
Figura 9 – Rede de monitoramento da qualidade do ar no Paraná	38
Figura 10 – Exemplos de <i>Tradescantia</i>	47
Figura 11 – Ensaio Trad-MCN. Tétrades de <i>Tradescantia pallida</i>	48
Figura 12 – Ensaio Trad-SHM. Mutação rosa em <i>Tradescantia</i>	48
Figura 13 – Localização dos municípios e pontos estudados (estações).....	52
Figura 14 – Filtro de café de celulose, com fibra mais fina e trama mais densa.....	53
Figura 15.A – <i>Raspberry Pi 3 Model B+</i>	54
Figura 15.B – Sensor SDS011	54
Figura 16 – Conjunto <i>Raspberry Pi</i> + Sensor SDS011	54
Figura 17 – Montagem do SDS011 indicada pelo fabricante (horizontal).....	55
Figura 18 – Estrutura do sistema de medição.....	55
Figura 19 – Vasos com as mudas de <i>Tradescantia sp.</i> clone 4430	56
Figura 20 – Vasos com <i>Tradescantia sp.</i> clone 4430 em um dos locais de amostragem (Bairro Mercês)	56
Figura 21 – Ilustração das mutações que podem ser observadas no ensaio Trad-SHM.....	58
Figura 22 – Sequência de análise da <i>Tradescantia sp.</i> clone 4430	58
Figura 23 – <i>Tradescantia sp.</i> clone 4430 e suas principais partes	59
Figura 24 – Diagrama de um pelo estaminal normal de <i>Tradescantia</i> e exemplos de aberrações que podem ser observadas	59
Figura 25 – Análise temporal do período de correlação para MP ₁₀ e MP _{2.5} para o ponto Batel	62
Figura 26 – Rotina da análise de dados para MP e Trad-SHM	63

Figura 27 – <i>Boxplot</i> referente as mutações em pelo estaminal do ponto de controle.....	64
Figura 28 – Gráfico das médias diárias para MP ₁₀ e MP _{2.5} do ponto de controle.....	65
Figura 29 – Aberrações encontradas durante a análise do bioensaio Trad-SHM.....	67
Figura 30 – Mutações em pelo estaminal observadas pelo bioensaio Trad-SHM.....	67
Figura 31 – <i>Boxplot</i> da frequência de mutação em pelo estaminal	68
Figura 32 – Concentrações das médias diárias de MP ₁₀	73
Figura 33 – Concentrações das médias diárias de MP _{2.5}	73
Figura 34 – Gráfico de MP ₁₀ e MP _{2.5} x <i>Tradescantia</i> sp. clone 4430 para Curitiba	79
Figura 35 – Gráfico de MP ₁₀ e MP _{2.5} x <i>Tradescantia</i> sp. clone 4430 para o ponto Batel.....	79
Figura 36 – Gráfico de MP ₁₀ e MP _{2.5} x <i>Tradescantia</i> sp. clone 4430 para o ponto Mercês	80
Figura 37 – Gráfico de MP ₁₀ e MP _{2.5} x <i>Tradescantia</i> sp. clone 4430 para o ponto Jd. Botânico	80
Figura 38 – Gráfico de MP ₁₀ e MP _{2.5} x <i>Tradescantia</i> sp. clone 4430 para o ponto Jd. das Américas	81
Figura 39 – Gráfico de MP ₁₀ e MP _{2.5} x <i>Tradescantia</i> sp. clone 4430 para o ponto Boa Vista	81
Figura 40 – Gráfico de MP ₁₀ e MP _{2.5} x <i>Tradescantia</i> sp. clone 4430 para o ponto Orleans....	82
Figura 41 – Gráfico de MP ₁₀ e MP _{2.5} x <i>Tradescantia</i> sp. clone 4430 para o ponto Guaíra	82
Figura 42 – Gráfico de MP ₁₀ e MP _{2.5} x <i>Tradescantia</i> sp. clone 4430 para o ponto Araucária	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre fontes e os poluentes característicos	24
Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos equipamentos de monitoramento dos poluentes atmosféricos	37
Quadro 3 – Sensores utilizados para medição de material particulado e suas especificações .	40
Quadro 4 – Resumo dos bioensaios.....	45
Quadro 5 – Exemplos de bioindicadores usados em vários meios.....	45
Quadro 6 – Pontos de amostragem para Curitiba e Araucária	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões de qualidade do ar	27
Tabela 2 – Padrões para monitoramento da qualidade do ar	28
Tabela 3 – Índice de qualidade do ar	29
Tabela 4 – Resultados do p-valor para teste de normalidade – Controle	66
Tabela 5 – Resultado do teste de <i>post-hoc</i> aplicado após KW – Controle.....	66
Tabela 6 – Correlação de Spearman para os dados do ponto de controle	66
Tabela 7 – Mediana, média e desvio padrão para a frequência de mutação em pelo estaminal (número de mutações por 1000 pelos estaminais).....	68
Tabela 8 – Resultados do p-valor para a estatística de SW – todos os pontos	69
Tabela 9 – Resultados do p-valor para as estatísticas, englobando todos os resultados da frequência de mutação em pelo estaminal.....	69
Tabela 10 – Resultados do p-valor para a estatística de KW – Trad-SHM.....	70
Tabela 11 – Resultado do teste de <i>post-hoc</i> aplicado após KW – Trad-SHM	70
Tabela 12 – Resultados do p-valor para a estatística de SW e Levene para MP ₁₀ e MP _{2.5}	75
Tabela 13 – Resultados do p-valor para as estatísticas, englobando todos os resultados das concentrações de MP ₁₀ e MP _{2.5}	76
Tabela 14 – Resultados do p-valor para a estatística de KW – MP ₁₀ e MP _{2.5}	76
Tabela 15 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para MP ₁₀	77
Tabela 16 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para MP _{2.5}	77
Tabela 17 – Resultados do p-valor para a estatística de SW e Levene – todos os pontos.....	84
Tabela 18 – Resultados do p-valor para a estatística de KW – Trad-SHM x MP	84
Tabela 19 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para Batel	85
Tabela 20 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para Mercês	85
Tabela 21 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para Jardim Botânico	85
Tabela 22 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para Jardim das Américas	85
Tabela 23 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para Boa Vista.....	86
Tabela 24 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para Orleans	86
Tabela 25 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para Guaira.....	86
Tabela 26 – Resultado do teste <i>post-hoc</i> aplicado após KW para Araucária	86
Tabela 27 – Correlação de Spearman para os dados de frequência de mutação e concentração de MP.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCOHS	<i>Canadian Center of Occupational Health and Safety</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cfb	Clima temperado propriamente dito
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
EEA	<i>European Environment Agency</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETI	<i>Environnement Et Technologie International</i>
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
HCl	Ácido Clorídrico
HF	Ácido Fluorídrico
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IAT	Instituto Água e Terra
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento
IQAr	Índice de Qualidade do Ar
KW	Kruskal-Wallis
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LEA2	Laboratório de Engenharia Ambiental
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MP	Material Particulado
MP _{0.1}	Material Particulado inferior a 2.5µm
MP ₁₀	Material Particulado até 10µm
MP _{2.5}	Material Particulado até 2.5µm
nm	Nanômetro
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₃	Ozônio Troposférico
Pb	Chumbo
PC	<i>Personal Computer</i>

ppb	Partes por bilhão
ppm	Partes por milhão
PROEPAR	Plano Estadual de Controle da Poluição do Ar e de Proteção da Atmosfera
PTS	Partículas Totais em Suspensão
RCP	<i>Royal College of Physicians</i>
SEMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO ₃	Trióxido de Enxofre
SW	Shapiro-Wilk
Trad-MCN	<i>Tradescantia</i> Micronucleus bioassay
Trad-SHM	<i>Tradescantia</i> Stamen Hair Mutation bioassay
UFPR	Universidade Federal do Paraná
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>
µg/m ³	Micrograma por metro cúbico
µm	Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo principal	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
2	REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1	POLUIÇÃO DO AR	23
2.2	MATERIAL PARTICULADO	25
2.3	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA E QUALIDADE DO AR	27
2.4	QUALIDADE DO AR E SAÚDE PÚBLICA	30
2.5	QUALIDADE DO AR E MANUTENÇÃO DAS ÁREAS VERDES	33
2.5.1	Efeitos dos poluentes na vegetação	34
2.6	MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR	35
2.7	SENSORES DE BAIXO CUSTO APLICADOS AO MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR	39
2.8	BIOMONITORAMENTO	44
2.8.1	<i>Tradescantia</i>	46
3	METODOLOGIA	51
3.1	DESCRIÇÃO DOS LOCAIS DE ESTUDO	51
3.2	DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DO MONITORAMENTO ATIVO DO BIOINDICADOR E SENSOR SDS011	51
3.3	<i>RASPBERRY PI</i> E SENSOR SDS011	53
3.4	<i>Tradescantia</i> sp. clone 4430	55
3.5	PROCEDIMENTOS PARA COLETA DAS FLORES E PREPARO DAS LÂMINAS EM LABORATÓRIO	56
3.6	TRATAMENTO DOS DADOS DO SENSOR SDS011	60
3.7	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	MATERIAL PARTICULADO E TRAD-SHM – PONTO DE CONTROLE	64
4.2	TRAD-SHM PARA TODOS OS PONTOS DE MONITORAMENTO	66

4.3	CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO	72
4.4	RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA DE MUTAÇÃO E A CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO.....	78
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A – CÓDIGO PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS DO SENSOR SDS011.....	106
	APÊNDICE B – CÓDIGO PARA TRANSMISSÃO DOS ARQUIVOS GERADOS NA AQUISIÇÃO DOS DADOS	106
	APÊNDICE C – CÓDIGO PARA LEITURA DOS DADOS EM .TXT PARA CONVERTER EM .CSV	108
	APÊNDICE D – CÓDIGO PARA VERIFICAR O DIA DE MAIOR CORRELAÇÃO	109
	APÊNDICE E – GRÁFICOS DA ANÁLISE TEMPORAL DE CORRELAÇÃO DE MP₁₀ E MP_{2.5}	112
	ANEXO A – FICHAS DE IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DE MONITORAMENTO	115
	ANEXO B – CERTIFICADOS DE CE/FCC/RoHS, VERIFICAÇÃO E CONFORMIDADE DO SENSOR SDS011.....	119

1 INTRODUÇÃO

As influências das ações antrópicas na qualidade do ar se intensificaram após o evento da revolução industrial, na busca pelo crescimento econômico e social e o desenvolvimento de grandes centros urbanos e industriais, crescimento populacional e o aumento na frota de veículos e a busca por novas tecnologias (ORLANDO *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2010; MAIA *et al.*, 2014). No mundo, o adensamento populacional se concentra na área urbana e se agrava quando o país está em desenvolvimento e as políticas de controle e mitigação dos efeitos dos poluentes não acompanham este acelerado crescimento (SANTANA *et al.*, 2012; PRÜSS-UTÜN *et al.*, 2016).

Para Braga *et al.* (2002) e Mario (2012), a poluição atmosférica causada pelas atividades antrópicas consiste na concentração elevada de materiais sólidos, líquidos ou gasosos, que podem causar consequências em materiais, animais, vegetais e nos seres humanos. Segundo Amâncio e Nascimento (2012) e Pereira e Limongi (2015), os poluentes presentes no ar estão associados com internações referentes a problemas respiratórios tanto infecciosos como inflamatórios, neurológico, cardíaco entre outros. O ecossistema também está exposto ao risco da poluição, pois a deposição destas partículas em plantas pode impactar no seu desenvolvimento, a chuva ácida pode contaminar solo e recursos hídricos, além de danificar estruturas, resultando em desequilíbrio que pode afetar todo o bioma terrestre e aquático (SANTANA *et al.*, 2012). Por isso há importância de se monitorar a qualidade do ar, pois com os dados obtidos pode-se propor mudanças nas políticas públicas referentes ao controle de emissões atmosféricas, qualidade do ar e saúde pública.

Diante deste cenário, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 491 de 2018 (BRASIL, 2018) foi aprovada com o propósito de estabelecer padrões de qualidade do ar para todo o país, assim como cada estado deve realizar o monitoramento da qualidade do ar de acordo com padrões determinados pela resolução. No estado do Paraná, há ainda a Lei Estadual nº 13.806 de 2002 que dispõe sobre as atividades pertinentes ao controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar, e a Resolução Conjunta da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Instituto Ambiental do Paraná (SEMA/IAP) nº 3 de 2017 que dispõe sobre a implantação do Plano Estadual de Controle da Poluição do Ar e de Proteção da Atmosfera – PROEPAR.

Para seguir as normativas indicadas no parágrafo anterior, os estudos da dinâmica dos poluentes na atmosfera e seus efeitos na saúde dos seres vivos são feitas por vários métodos, como físicos, químicos, biológicos ou a união desses três. Uma alternativa para

realizar o monitoramento com baixo custo é o uso do biomonitoramento ambiental, com a utilização de espécies vegetais ou animais. Outra alternativa de baixo custo é o uso de sensores eletrônicos que podem ser instalados em qualquer local, ocupando pouco espaço e de fácil manutenção, sendo um instrumento que pode ser aplicado no monitoramento da qualidade do ar (LEITE, 2016). Assim, o uso de bioindicadores fornecem respostas aos riscos e impactos que os poluentes podem causar nos organismos vivos, enquanto os sensores eletrônicos são utilizados para verificar valores e limites das concentrações dos poluentes, ou seja, são alternativas complementares de monitoramento da qualidade do ar (ALVES *et al.* 2001; CARNEIRO, 2004).

Os poluentes atmosféricos não dependem somente de suas fontes de emissão, mas também dos agentes de dispersão, que contribuem para que um poluente possa se deslocar na atmosfera por quilômetros ou fique concentrado em um lugar, normalmente no seu local de origem e arredores. Por isso os fenômenos meteorológicos devem ser considerados nos estudos de qualidade do ar e concentração de poluentes, pois tais fenômenos exercem um papel importante em relação a poluição do ar, tal que possibilitam estabelecer uma correlação entre a fonte poluidora e o receptor (TORRES e MARTINS, 2005). Para compreender como ocorre a distribuição espacial e temporal dos poluentes é necessário analisar a meteorologia local, como a direção e velocidade do vento, temperatura e umidade do ar e precipitação (HIEN *et al.*, 2002; LAAKSO *et al.*, 2003, ELMINIR, 2005, DERISIO, 2012).

Outro ponto que se pode levar em consideração nos estudos de qualidade do ar e dispersão dos poluentes é a presença de áreas verdes, principalmente na área urbana onde se concentra a maior parte dos poluentes e a supressão de áreas verdes é maior em comparação com a área rural. A intensa urbanização provoca alterações na paisagem local, no microclima da região, no ciclo hidrológico, relevo, fauna e flora, sendo que a ausência deste último interfere nos demais (ALBUQUERQUE e LOPES, 2016). Áreas verdes no meio urbano podem ser parques, áreas de preservação, praças, hortas comunitárias, telhados verdes entre outros que trazem benefícios ambientais, sociais, econômicos e de saúde para a comunidade local (COUTTS e HAHN, 2015). Por isso, a importância de estudar as interações entre o meio urbano, as áreas verdes, o microclima do local e a concentração de material particulado, para entender a real importância e contribuição da vegetação na qualidade ambiental.

A supressão das áreas verdes citada no parágrafo anterior se dá em decorrência da crescente urbanização e uma das consequências dessa expansão é a redução de espaços verdes para novas construções ocorrendo assim o crescimento vertical dos municípios. Porém, essa verticalização forma uma barreira que contribui para a alteração da dinâmica do fluxo de ar e

gera os microclimas urbanos, também denominados cânions urbanos e estes dificultam a dispersão de poluentes (KARRA, MALKI-EPSHTEIN e NEOPHYTOU, 2017).

O interesse sobre questões ambientais e o comportamento dos poluentes vem aumentando nos últimos anos, de modo que a produção científica seja vista como uma ferramenta importante para auxiliar na tomada de decisões no meio político no que tange o controle de poluentes atmosféricos, estabelecimento de padrões que se adequem às condições locais, implementação e ampliação de redes de monitoramento e participação da comunidade no combate a poluição, pois através da ciência contribui-se para melhorar a qualidade do ar (CARDOSO, 2018; MACHADO, 2019).

1.1 JUSTIFICATIVA

A poluição do ar está presente no nosso dia a dia devido, em sua maior parte, por ações antropogênicas e pode ser considerada uma ameaça à saúde pública.

Lançamentos indiscriminados e muitas vezes sem nenhum tratamento de substâncias nocivas na atmosfera têm impactado fortemente na qualidade do ar que respiramos. Por isso a importância da participação da sociedade em cobrar dos gestores públicos e dos órgãos competentes um maior rigor na gestão da qualidade do ar e cumprimento de normativas existentes.

Em grandes centros urbanos, o ar, muitas vezes apresenta-se com baixa qualidade, devido ao grande número de indústrias e circulação de veículos. Realizar o monitoramento das concentrações dos poluentes nocivos à saúde seria o ideal para auxiliar os gestores no planejamento de ações para mitigar esta situação e promover bem-estar. Porém, muitas vezes este controle não é realizado ou não é eficaz devido ao alto custo e sofisticação dos equipamentos, inviabilizando um monitoramento em toda a área do município. Em função disto, a adoção de medidas complementares e mais baratas, como o uso de sensor de baixo custo e bioindicadores vegetais, deve ser vista como uma alternativa para a identificação de áreas críticas para o monitoramento da qualidade do ar.

Com isso, uma das hipóteses deste trabalho é verificar se a *Tradescantia* sp. clone 4430, que é comumente empregada em estudos de biomonitoramento da qualidade do ar, é sensível aos poluentes presentes no ar e ao material particulado, além de outros gases presentes na atmosfera, através do bioensaio de pelo estaminal Trad-SHM.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo principal

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do biomonitoramento da qualidade do ar através dos efeitos mutagênicos causados por poluentes atmosféricos nos municípios de Curitiba e Araucária.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Verificar a capacidade da *Tradescantia* sp. clone 4430 como bioindicadora das alterações da qualidade do ar através do bioensaio em pelo estaminal Trad-SHM;
- ii. Avaliar a presença e regularidade de alterações mutagênicas em pelo estaminal das flores ao longo do período de exposição nos pontos estudados neste trabalho como controle de incidência da poluição e alteração da qualidade do ar.
- iii. Associar a relação da presença de mutações em pelo estaminal das amostras com a concentração de MP₁₀ e MP_{2.5} durante o período de exposição.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O documento está organizado da seguinte forma:

I) O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica com a definição de poluição do ar com a classificação e origem dos poluentes. Na sequência é apresentado uma definição de material particulado e sua composição. Em outro tópico são apresentadas as principais legislações vigentes em âmbito nacional e estadual referente ao monitoramento da qualidade do ar. A relação entre a qualidade do ar e a saúde pública são apresentados em tópico subsequente, onde são apresentadas algumas consequências para a população quando há uma baixa qualidade do ar. Em outro tópico, aborda-se sobre a importância da manutenção das áreas verdes nos municípios, que vão além de embelezar e proporcionar melhor conforto térmico para os habitantes, mas também colaboram para a retenção de alguns poluentes presentes no ar. Na sequência é discutido sobre o monitoramento da qualidade do ar e a importância da quantificação dos poluentes, a fim de verificar se estes estão dentro dos limites regulamentados pela legislação. Como alternativa para ampliar e complementar a rede de monitoramento convencional de um município, apresenta-se os sensores de baixo custo, que

são equipamentos menores e de fácil instalação e manuseio e que contribuem para uma maior disponibilização de dados referente aos poluentes. Ainda sobre complementar a rede de monitoramento convencional, é apresentado o biomonitoramento, que é a resposta de organismos vivos quando expostos a um ambiente alterado por poluentes. Por fim, apresenta-se a *Tradescantia*, que é uma planta muito utilizada em processos de biomonitoramento ambiental;

II) O Capítulo 3 apresenta a metodologia empregada para o desenvolvimento desta pesquisa, como a definição dos locais, o uso do sensor de baixo custo para material particulado, o uso do bioindicador para monitorar qualitativamente a presença de poluentes e o tratamento estatístico para estes dados;

III) O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nesta pesquisa e sua devida discussão, como a concentração de material particulado nos pontos amostrados e as mutações ocorridas no bioindicador.

IV) O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Visando facilitar a leitura do trabalho, informações complementares e outros dados gerados durante a pesquisa, foram disponibilizados no Anexo e Apêndice. A figura 1 ilustra resumidamente as etapas da pesquisa.

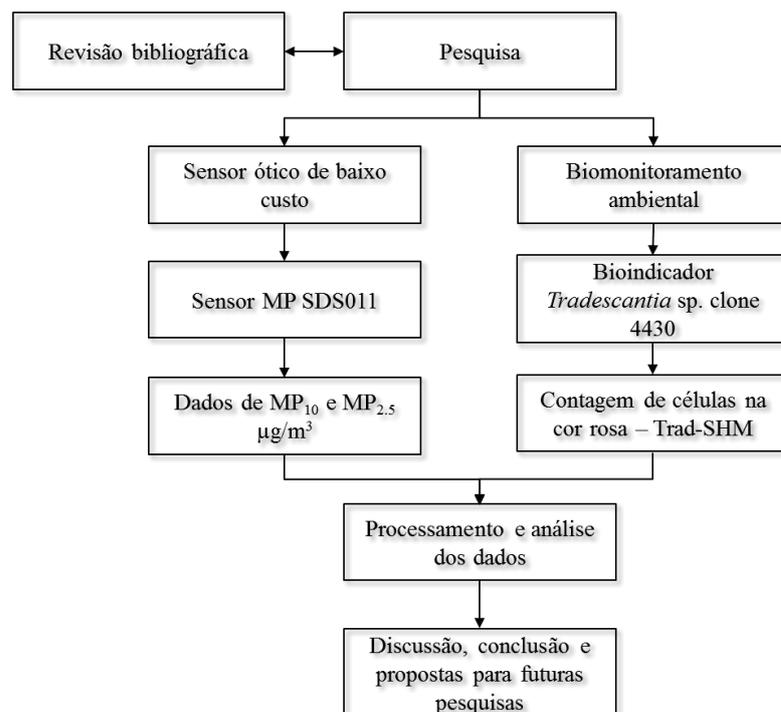


Figura 1 – Organização da pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 POLUIÇÃO DO AR

O processo de poluição do ar pode ser dividido em três momentos: o primeiro é a emissão dos poluentes na atmosfera (aspecto ambiental); o segundo é o transporte (ventos), diluição e alteração química ou física dos poluentes e o terceiro é a imissão dos poluentes (impacto ambiental) (DE NEVERS, 1995 *apud* LISBOA e SCHIRMER, 2007). A figura 2 retrata estes três momentos.

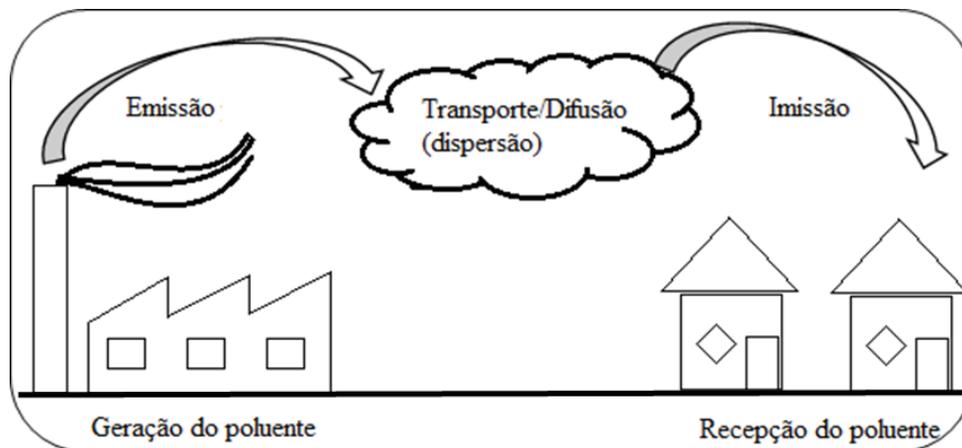


Figura 2 – Processo de poluição do ar.

A Resolução CONAMA nº 3 de 1990 (BRASIL, 1990), define poluição atmosférica como o resultado das alterações das características físicas, químicas e biológicas que podem causar danos aos seres humanos, fauna, flora, materiais e meio ambiente como um todo (BRASIL, 1990). Considera-se que uma atmosfera está poluída quando os limites adequados de algumas substâncias são ultrapassados, limites estes que são definidos a partir de estudos científicos para determinados componentes químicos, físicos ou biológicos que possam colocar em risco a saúde da população humana (NACARATTI *et al.*, 2012).

Para se determinar o nível de poluição do ar em um dado local, deve-se quantificar os poluentes em um intervalo de tempo. Através desta quantificação, obtêm-se um valor denominado “concentração” do poluente expresso normalmente em micrograma por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), partes por milhão (ppm) ou partes por bilhão (ppb). A Resolução CONAMA nº 3 de 1990 (BRASIL, 1990) define alguns padrões para estas quantificações e seus limites, onde o padrão primário são as concentrações de poluentes que ultrapassaram os limites estabelecidos e podem causar danos à saúde da população humana e o padrão secundário são

as concentrações que não ultrapassaram os limites recomendados, mas que ainda podem causar algum efeito mais brando no meio ambiente em geral (BRASIL, 1990).

Os poluentes podem ser classificados quanto a sua formação, em primários e secundários. Os poluentes primários são aqueles emitidos direto da fonte e permanecem com a mesma composição em que foram liberados, exemplo: poeiras, compostos de enxofre, óxidos de carbono, compostos de nitrogênio, compostos orgânicos e compostos radioativos (TORRES e MARTINS, 2005). Os poluentes secundários são aqueles produzidos na atmosfera, em decorrência de reações com os poluentes primários ou outros, exemplo: ozônio troposférico, formado a partir da reação química entre óxido de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs) com intensa luminosidade (BOIAN e ANDRADE, 2012).

A origem dos poluentes pode ser denominada como fonte e esta pode ser dividida em natural e antrópica e dentro da antrópica há outra divisão: fontes móveis e fixas. As fontes fixas podem ainda ser divididas em dois grupos: o primeiro são as atividades não industriais, como por exemplo, padarias, hotéis, hospitais, lavanderias, churrasqueiras, pizzarias entre outros que utilizam da queima de algum combustível para realizar suas atividades; o segundo são as industriais propriamente ditas, que individualmente podem produzir poluentes significativos (CAVALCANTI, 2010). O quadro 1 traz esta divisão de fontes e seus principais poluentes.

Quadro 1 – Relação entre fontes e os poluentes característicos.

Fontes		Poluentes
Fixas	Combustão	Material particulado, dióxido de enxofre e trióxido de enxofre, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio.
	Processos industriais	Material particulado (fumos, poeiras, névoas), gases – SO_2 , SO_3 , HCl, HF, H_2S , NO_x , hidrocarbonetos, mercaptanas.
	Queima de resíduo sólido	Material particulado, gases – SO_2 , SO_3 , HCl, NO_x .
	Outros	Hidrocarboneto, material particulado.
Móveis	Veículos automotores, motocicletas, aviões, barcos, locomotivas entre outros	Material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, aldeídos, dióxido de enxofre, ácidos orgânicos.
Naturais		Material particulado – poeiras, gases – SO_2 , H_2S , CO, NO, NO_2 , hidrocarbonetos.
Reações químicas na atmosfera Exemplo: hidrocarboneto + óxido de nitrogênio (luz solar)		Poluentes secundários – O_3 , aldeídos, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos, aerossol fotoquímico.

Fonte: EEA (2013), Castelhana (2019).

Há ainda locais denominados sumidouros, onde os poluentes “desaparecem” do ar através de processos de captação pelos vegetais, solos, corpos d’água, oceanos entre outros (CAVALCANTI, 2010). O tempo de vida de um poluente na atmosfera depende da sua

reatividade, tendência de deposição e condição meteorológica e sua vida útil pode variar entre horas, dias e anos (WHO, 2006). A figura 3 apresenta um esquema das escalas espaciais e temporais da vida útil de alguns poluentes atmosféricos.

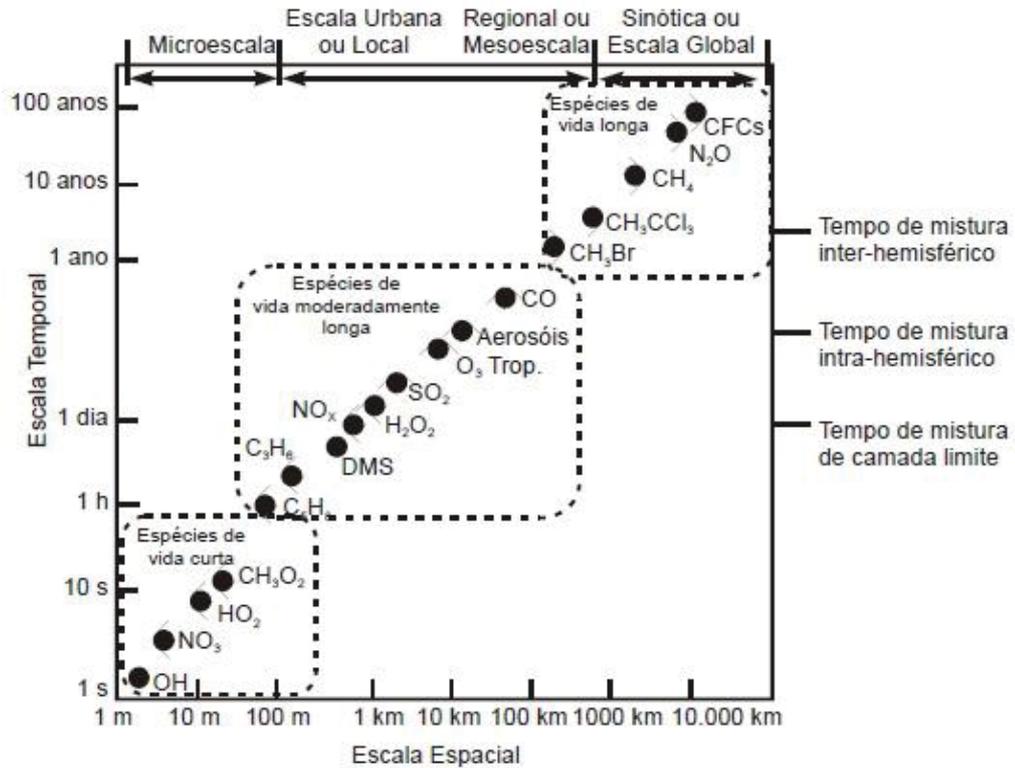


Figura 3 – Tempo de residência dos poluentes na atmosfera.
Fonte: Manahan (2013) *apud* Nascimento (2016).

Pode-se notar na figura 3 que os compostos com maior tempo de residência são aqueles que têm uma tendência de serem transportados a longas distâncias; já os intermediários são encontrados na área urbana e região de entorno; e os com tempo de residência baixo são considerados instáveis e se dissipam na atmosfera com facilidade (MEEHL *et al.*, 2007; MANAHAN, 2013 *apud* NASCIMENTO, 2016).

Para avaliar os impactos que a poluição atmosférica causa, é imprescindível a sua correta caracterização e identificar sua fonte, para definir a ação mais apropriada contra estes poluentes, a fim de reduzi-los.

2.2 MATERIAL PARTICULADO

O material particulado (MP) encontrado no ar é uma complexa mistura de partículas de diferentes granulometrias. Historicamente, as concentrações de MP eram determinadas

opticamente medindo a “escuridão” de um filtro depois que este era exposto ao ar e essa medida era denominada de fumaça preta e segue o mesmo princípio de medição que o *black carbon*, que é a parte do MP que mais absorve luz, criado pela combustão incompleta de combustíveis (RCP, 2016).

A métrica “fumaça preta” foi substituída pelo material particulado de acordo com o diâmetro aerodinâmico das partículas, sendo denominado MP_{10} as partículas com diâmetro de até 10 micrômetros (μm), $MP_{2.5}$ são as partículas com diâmetro menores que $2,5\mu\text{m}$ (também denominado de partícula fina) e partículas ultra finas, que possuem diâmetro menor que $0,1\mu\text{m}$ (100 nanômetros – nm). Estas diferenças entre os diâmetros das partículas são relevantes para o estudo na área da saúde, pois partículas menores que $10\mu\text{m}$ são inaladas pelos seres humanos e se alojam nos pulmões, já as nano partículas ($0,1$ a $0,001\mu\text{m}$) podem chegar à corrente sanguínea (RCP, 2016).

A composição do MP é variável dependendo do local e sua formação é classificada como primária e secundária. Partículas primárias são aquelas emitidas direto da fonte, como solos expostos, construções, estradas de chão batido, campo, chaminés ou incêndio. As partículas secundárias são formadas através de reações químicas e/ou mecânica com substâncias como o dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio emitido a partir de usinas, indústrias, e veículos automotores (EPA, 2018).

A figura 4 apresenta as frações de tamanho de material particulado e outros componentes encontrados no ar, que estão relacionadas ao meio ambiente e saúde pública.

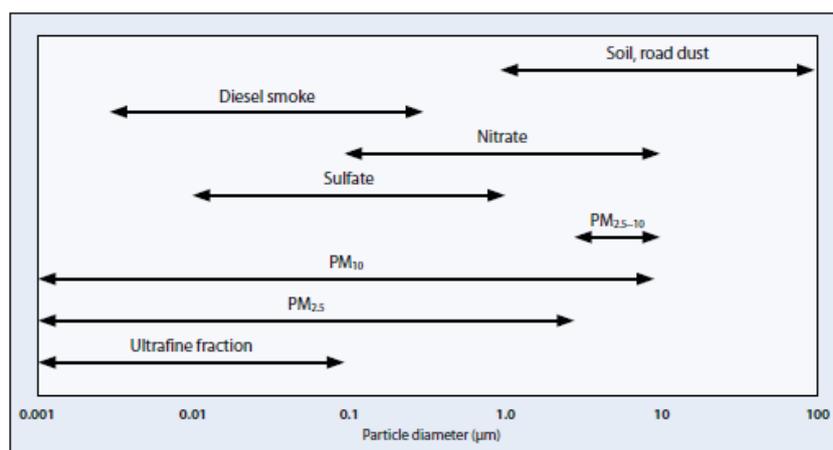


Figura 4 – Faixa de diâmetro de algumas partículas encontradas no ar.
Fonte: WHO, 2006.

Em ambientes urbanos, partículas finas e grossas estão presentes, porém, a concentração varia entre os municípios, pois depende da geografia local, meteorologia e

fontes de emissão do MP (WHO, 2006) e uma vez na atmosfera, as partículas de maior diâmetro tendem a se depositarem mais rapidamente em comparação com partículas de menor diâmetro, variando de minutos até anos (JACOBSON, 2012 *apud* BRITO, SODRÉ e ALMEIDA, 2018).

2.3 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA E QUALIDADE DO AR

A Organização Mundial da Saúde recomenda que os governos de suas respectivas federações, desenvolvam políticas que aspirem o bem-estar da população e do meio ambiente, no que diz respeito a poluição do ar, sendo uma sugestão, a implantação de ferramentas de gestão da qualidade que visem fixar padrões de qualidade do ar e como deve ser feito seu monitoramento (WHO, 2005).

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 3 de 1990 (BRASIL, 1990) foi criada com o intuito de estabelecer os primeiros padrões de qualidade do ar. A tabela 1 apresenta os valores máximos indicados nesta resolução para os padrões primários e secundários.

Tabela 1 – Padrões de qualidade do ar.

Poluente	Tempo médio de amostragem	Concentrações	
		Padrão Primário	Padrão Secundário
PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24h	240	150
	Anual	80	60
Fumaça ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24h	150	100
	Anual	60	40
MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24h	150	150
	Anual	50	50
SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24h	365	100
	Anual	80	40
CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ – ppm)	1h	40.000 – 35	40.000 – 35
	8h	10.000 – 9	10.000 – 9
O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1h	160	160
NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1h	320	190
	Anual	100	100

Fonte: Brasil (1990).

Em 2006 foi criada a Resolução CONAMA nº 382 (BRASIL, 2006), que estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos advindos de fontes fixas. Esta resolução foi elaborada devido ao aumento dos níveis de poluição observados, principalmente nos grandes centros urbanos e suas consequências para a saúde da população e ao meio ambiente. Esta resolução é uma revisão do CONAMA nº 8 de 1990.

A Resolução CONAMA nº 491 de 2018 (BRASIL, 2018) estabelece os padrões para a qualidade do ar e entre suas definições, está o IQAr, Índice de Qualidade do Ar, que são

valores referentes às concentrações dos poluentes monitorados que podem trazer prejuízos à saúde da população. A tabela 2 mostra os valores adotados para o monitoramento da qualidade do ar no Brasil.

Tabela 2 – Padrões para monitoramento da qualidade do ar.

Poluente	Período de Referência	PI-1 µg/m ³	PI-2 µg/m ³	PI-3 µg/m ³	PF µg/m ³	ppm
MP ₁₀	24h	120	100	75	50	
	Anual	40	35	30	20	
MP _{2.5}	24h	60	50	37	25	
	Anual	20	17	15	10	
SO ₂	24h	125	50	30	20	
	Anual	40	30	20		
NO ₂	1h	260	240	220	200	
	Anual	60	50	45	40	
O ₃	8h	140	130	120	100	
Fumaça	24h	120	100	75	50	
	Anual	40	35	30	20	
PTS	24h				240	
	Anual				80	
CO	8h					9
Pb ₅	Anual				0,5	

Fonte: Brasil (2018).

PI-1: Padrão de qualidade intermediário; PI-2, PI-3, PF: Padrões de qualidade intermediários e final.

Para entendermos melhor a gravidade destes poluentes citados nas tabelas 1 e 2 e porque deve-se realizar o monitoramento dos mesmos, vamos a algumas definições e alguns dos seus efeitos (FREEDMAN, 1995; BRAGA *et al.*, 2001, CETESB, 2013):

- Dióxido de enxofre (SO₂): gás incolor, com odor característico e irritante e quando em contato com superfícies úmidas, forma-se o ácido sulfúrico, que é muito corrosivo. São oriundos da combustão de elementos fósseis como carvão e petróleo e suas principais fontes são os veículos e termoelétricas.
- Óxidos de nitrogênio (NO_x): os mais significativos para a poluição do ar são o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂) e são formados nas câmaras de combustão de motores de veículos. O NO se ficasse puro, seria um gás inofensivo e não representaria riscos à saúde. Porém, ele se oxida facilmente para NO₂, que possui cor castanho claro, tem odor característico e muito irritante.
- Ozônio (O₃): gás azulado, com odor característico e muito reativo principalmente quando exposto a luz solar. O ozônio é um dos gases causadores de prejuízos no desenvolvimento de plantas desde as arbóreas até a produção agrícola, além de causar danos em monumentos e edificações.

- Fumaça: material particulado suspenso na atmosfera com origem dos processos de combustão e está relacionado ao teor de fuligem presente no ar.
- Partículas totais em suspensão (PTS): podem ser sólidos ou líquidos e ficam suspensos no ar em forma de neblina, aerossol, fumaça e fuligem e sua composição é bem variada e são produzidos por queimadas, poeiras ressuspensas, processos industriais e veículos.
- Monóxido de carbono (CO): é um gás inodoro, incolor, insípido e produzido pela queima incompleta de combustíveis e sua toxicidade foi uma das primeiras a ser estudada e, portanto, seus efeitos e interações com a atmosfera e nos seres humanos são bem conhecidos. Na presença de oxigênio molecular, ocorre a formação de dióxido de carbono, um dos gases contribuintes para o efeito estufa.
- Chumbo (Pb): é um metal que foi muito usado para aumentar a octanagem de combustíveis e eram liberados pelos escapamentos veiculares e facilmente precipitados ao solo, contaminando águas, plantas e tudo o que estiver no solo. Atualmente, o chumbo é encontrado em maior quantidade em locais próximos a fundições de chumbo e indústrias de fabricação de baterias chumbo-ácido.

As consequências das concentrações destes elementos para a população e o ambiente depende do tempo de exposição e a toxicidade de cada poluente, porém, estes dados de medição devem ser divulgados pelo município e estar disponível para todos, por isso o IQAr foi desenvolvido, com o intuito de facilitar a divulgação dos dados de monitoramento de uma maneira que seja de fácil compreensão e entendimento por todos. A tabela 3 relaciona o valor medido para cada poluente e sua classificação. Esta classificação é baseada no cálculo de um índice de qualidade do ar, que é uma ferramenta matemática utilizada para simplificar o processo de divulgação dos dados, sendo divulgado o índice mais elevado dentre os calculados para então classificá-lo (CETESB, 2019).

Tabela 3 – Índice de qualidade do ar.

Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m ³) 24h	MP _{2.5} (µg/m ³) 24h	O ₃ (µg/m ³) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ (µg/m ³) 1h	SO ₂ (µg/m ³) 24h	Fumaça (µg/m ³) 24h
N1 – Boa	0-40	0-50	0-25	0-100	0-9	0-200	0-20	0-50
N2 – Moderada	41-80	>50-100	>25-50	>100-130	>9-11	>200-240	>20-40	>50-100
N3 – Ruim	81-120	>100-150	>50-75	>130-160	>11-13	>240-320	>40-365	>100-150
N4 – Muito ruim	121-200	150-250	75-125	160-200	13-15	320-1130	365-800	150-250
N5 – Péssima	>200	>250	>125	>200	>15	>1130	>800	>250

Fonte: CETESB (2014).

Porém, não basta apenas, medir, calcular e identificar o índice de qualidade do ar do local, deve-se também realizar a divulgação destes dados em vários meios de comunicação possíveis para que todos tenham acesso e para que a população saiba onde buscar e ser informada sobre o IQAr de seu município. Vale ressaltar que todo resultado deve ser divulgado, seja ele bom ou ruim (MMA, 2019).

No estado do Paraná, a Lei nº 13.806 de 2002 (PARANÁ, 2002), está relacionada as atividades pertinentes do controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar. Na Lei não há descrição de padrões ou referências próprios do Estado do Paraná, indicando sempre o que está fixado pelo CONAMA. Há ainda as resoluções SEMA nº 54 de 2006 (PARANÁ, 2006) e nº 16 de 2014 (PARANÁ, 2014), que definem critérios para o controle da qualidade do ar, como um instrumento da gestão ambiental para a melhoria da qualidade de vida da população e proporcionar o desenvolvimento do Estado.

Vale ressaltar que os padrões descritos anteriormente são embasados de acordo com vários estudos científicos sobre os efeitos que determinados poluentes podem causar ao meio ambiente e à saúde e seus níveis de tolerância são estipulados para que haja uma margem de segurança, em caso de ocorrer algum sinistro que possa comprometer a qualidade do ar e a segurança da população.

2.4 QUALIDADE DO AR E SAÚDE PÚBLICA

Áreas urbanas concentram grande quantidade de compostos químicos oriundos da emissão dos poluentes por indústrias, veículos e outras fontes antropogênicas. Já foram identificados mais de três mil diferentes compostos provenientes das atividades humanas, e estes compostos causam grande preocupação referente ao impacto que podem causar à saúde humana e ambiente (GUARIEIRO, VASCONCELLOS e SOLCI, 2011).

A presença destes poluentes no ar pode interferir no processo de filtração e transporte de oxigênio aos pulmões, exigindo um esforço maior do aparelho circulatório e respiratório, o que pode acarretar em várias doenças, como uma simples alergia ou algo mais grave como pneumonia, doenças respiratórias e cardíacas.

Os efeitos da concentração de poluentes na atmosfera podem ser classificados de duas maneiras (EVANS e SMITH, 2005; CAVALCANTI, 2010):

1) Agudo: de caráter temporário associado a condições meteorológicas desfavoráveis para a dispersão dos poluentes, podem ocasionar irritação nos olhos e garganta; geralmente os efeitos são passageiros e melhoram depois de tratamento;

2) Crônico: de caráter permanente e mais crítico, pode causar prejuízo a vegetação, diminuir a visibilidade e causar desconforto nas pessoas de maneira mais grave que o efeito agudo, como afecções das vias respiratórias e neoplasias.

A principal referência entre a relação da poluição e seus efeitos ao meio ambiente é o ocorrido em Londres – Inglaterra em 1952 onde uma intensa estagnação atmosférica devido a uma inversão térmica e emissões elevadas de poluentes ocasionados pela queima de carvão e outros materiais, dificultaram a dispersão de MP e SO₂, o que gerou uma grande e espessa nuvem de poluição, que cobriu toda a cidade por cinco dias e este evento ficou conhecido como *smog* londrino ou “O grande nevoeiro”, que foi responsável por aproximadamente doze mil mortes além de cem mil doentes (BEREND, 2006 *apud* BRITO, SODRÉ e ALMEIDA, 2018). No Brasil, a principal referência é a região de Cubatão – São Paulo, que chegou a ser considerada a mais poluída na década de 1970, o que levou a ser chamada de “Vale da Morte” (ALONSO e GODINHO, 1992). Já na década de 1980, um incêndio em 1984 e um vazamento de amônia com evacuação em 1985, obrigaram as autoridades a adotar políticas públicas mais restritivas para a emissão de poluentes no estado de São Paulo (ALMEIDA, 2004).

O dano que os poluentes presentes na atmosfera podem causar no organismo irá depender de suas características físicas, químicas e físico-químicas, dentre elas, tamanho, forma, densidade, reatividade, velocidade de reação e concentração (PEIXOTO e FERREIRA, 2013). A capacidade do MP de ser absorvido pelas nossas vias aéreas será proporcional ao tamanho do mesmo, ou seja, quanto menor o diâmetro aerodinâmico da partícula, maior será a probabilidade de ser absorvido pelo corpo humano.

As partículas inaláveis podem passar pela cavidade nasal, bucal e ir até a laringe e as partículas finas podem ir mais fundo no sistema respiratório, chegando até os pulmões. Há ainda as partículas ultrafinas (MP_{0,1}) que podem passar os alvéolos pulmonares e chegar na corrente sanguínea (GUARIEIRO, VASCONCELLOS e SOLCI, 2011; KIM, KABIR e KABIR, 2015).

Partículas com maiores diâmetros sofrem um mecanismo denominado de impactação, onde estas não conseguem passar pelo trato respiratório ficando aderidas às mucosas das vias aéreas superiores, sendo expelidas naturalmente durante o processo de respiração. Já as partículas finas, conseguem passar para o trato respiratório superior e se alojam nas vias aéreas inferiores, no processo denominado sedimentação. E as partículas ultrafinas, sofrem o processo de difusão, onde as mesmas se alojam nos alvéolos pulmonares (CCOHS, 2018)

As figuras 5 e 6 representam o processo de deposição das partículas no sistema respiratório.

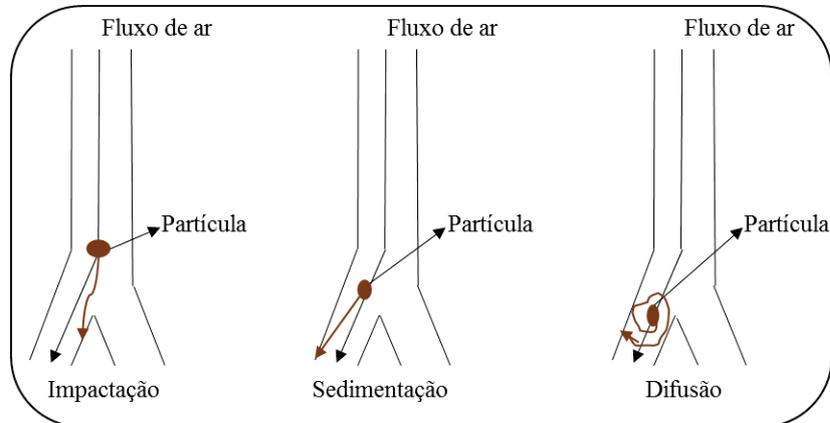


Figura 5 – Diagrama representativo dos diferentes tipos de mecanismos de deposição das partículas.

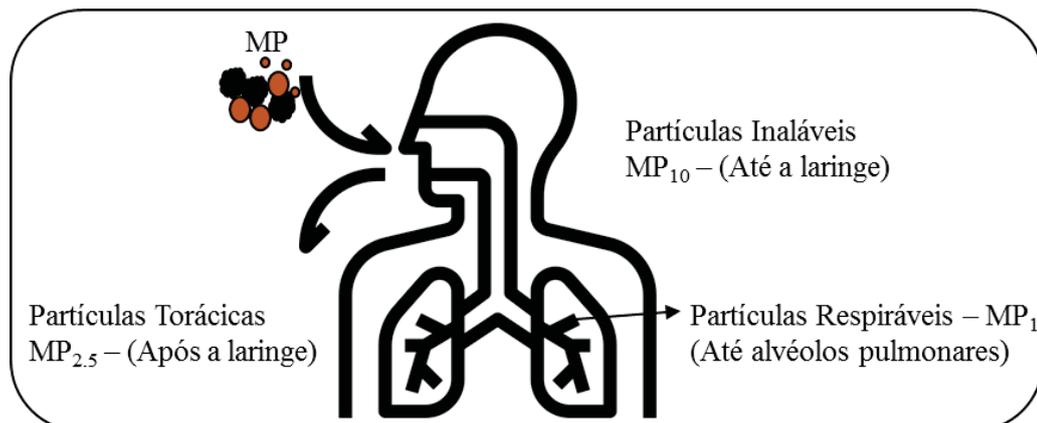


Figura 6 – Representação da inalação do MP com tamanhos de diâmetros diferentes e sua localização no corpo humano.

Há diversos estudos na literatura que apontam a relação entre a concentração de $MP_{2.5}$ e MP_{10} e doenças do trato respiratório, cardíaco, câncer, demência entre outros. O monitoramento destas partículas é comum no mundo todo, porém, as partículas ultrafinas não são monitoradas e são elas que contribuem com cerca de 80% do número de partículas presente no MP total e são as responsáveis pelo agravamento na saúde pública devido a sua capacidade de chegar até a corrente sanguínea (figura 6) (REGGENTE *et al.*, 2015; BALDAUF *et al.*, 2016). E como visto anteriormente, a legislação brasileira também não trata do monitoramento do $MP_{0.1}$, o que pode limitar a realização de estudos relacionados ao impacto destas partículas na saúde.

Os efeitos que agentes tóxicos podem causar à saúde dependem da relação entre o tipo de poluente, sua concentração, tempo de exposição e a sensibilidade do indivíduo.

2.5 QUALIDADE DO AR E MANUTENÇÃO DAS ÁREAS VERDES

A manutenção de áreas verdes e jardins remontam desde a antiguidade com a finalidade de serem locais para passeios e repouso. Hoje com a intensa urbanização, a existência de parques e jardins depende de legislação para a sua existência (LIMA e AMORIM, 2006). Como consequência desta urbanização, os impactos ambientais são diversos, como perda de cobertura vegetal, extinção de espécies tanto de flora como fauna, impermeabilização e degradação de solos, adversidades climáticas e poluição de água, ar e solo (PASQUALOTTO e SENA, 2017). A presença de vegetação nos centros urbanos traz vários benefícios como conforto térmico, infiltração da água da chuva pelo solo, abastecendo lençóis freáticos, redução de ruídos, valorização imobiliária e filtragem dos poluentes atmosféricos, porém, se o manejo destas áreas não for adequado ou a utilização de espécies não nativas, pode ocasionar problemas futuramente (MARQUES *et al.*, 2019).

Áreas verdes assim como os poluentes variam para cada local de estudo, mas o que é comum para todos os lugares é que espaços verdes influenciam na qualidade do ar através da remoção de poluentes atmosféricos e alterando o microclima local, melhorando assim a qualidade ambiental e saúde da população (NOWAK *et al.*, 2014). Para Nowak (1995), as árvores influenciam na atmosfera urbana seguindo quatro modos interativos que podem ser lembrados usando as iniciais da palavra TREE (árvore em inglês): 1) temperatura e efeitos microclimáticos; 2) remoção de poluentes; 3) emissão de compostos orgânicos voláteis pelas árvores e emissões devido a manutenção das mesmas; 4) conservação de energia em edifícios; o efeito cumulativo desses quatro fatores determina a importância de áreas verdes para a atmosfera urbana e a poluição.

A poluição gasosa do ar é absorvida pelos estômatos das folhas das plantas, sendo que alguns gases são removidos pela superfície da planta (SMITH, 1990, *apud* NOWAK e DWYER, 2010). Partículas também são interceptadas pelas árvores e ficam retidas na superfície da planta (NOWAK *et al.*, 2014). No trabalho de Smith (1990) *apud* Nowak e Dwyer (2010) ele descreve que a vegetação é apenas um local temporário para os poluentes, principalmente as partículas, que podem ser ressuspensas lavadas pela precipitação ou depositadas no solo com a queda das folhas e galhos. Em seu trabalho, Nowak e Dwyer (2010) descrevem que alguns fatores afetam a remoção da poluição pelas árvores, como a porcentagem de área foliar superficial saudável, a concentração de poluentes e as variáveis meteorológicas, sendo que estes autores apresentam um gráfico da remoção dos poluentes

pelas árvores em um estudo na Filadélfia – EUA, em 1994, onde mostra a variação ao longo de um ano a remoção dos poluentes pelas árvores (figura 7).

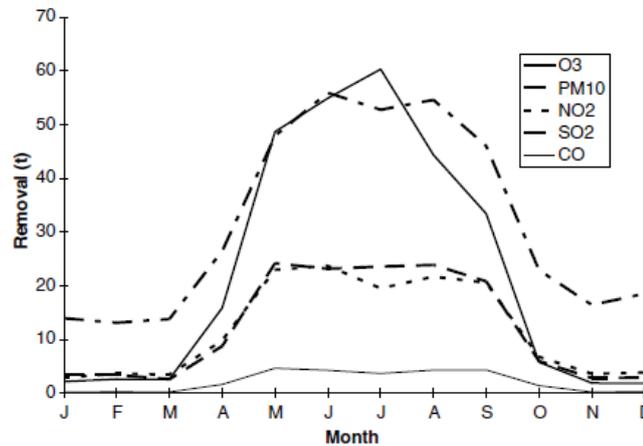


Figura 7 – Remoção mensal de poluentes pelas árvores na Filadélfia-EUA.
Fonte: Nowak e Dwyer (2010).

Pela figura 7 nota-se que a remoção dos poluentes ocorreu entre os meses de março e setembro, que corresponde a primavera e verão no hemisfério norte, período em que a vegetação está mais viçosa, ocorrendo assim maior absorção dos poluentes pelos estômatos das folhas (SMITH, 1990 *apud* NOWAK e DWYVER, 2010). Ainda que seja uma melhora de baixo percentual na qualidade do ar, esta pode ser aumentada através do incremento das áreas verdes nos municípios, levando em consideração um bom planejamento, projeto e gerenciamento destas áreas (NOWAK, CRANE e STEVENS, 2006).

2.5.1. Efeitos dos poluentes na vegetação

No item anterior, foi mencionado a importância de áreas verdes para a manutenção da qualidade do ar, através da diminuição das ilhas de calor e absorção dos poluentes ou deposição temporária dos mesmos, além de outros benefícios já citados. Porém, estes poluentes quando interagem com a estrutura da planta, seja através do ar, água ou solo, pode trazer danos significativos ao vegetal que variam em função do tempo de exposição da planta ao poluente e a sua concentração.

Normalmente, os poluentes atmosféricos entram na planta através dos estômatos foliares (poros existentes na epiderme das folhas que permitem as trocas gasosas com o meio ambiente) e dentre os poluentes já citados aqui, os NO_x , SO_2 e O_3 são os mais tóxicos para as plantas (SAVÓIA, 2007). O NO_x e SO_2 podem ser absorvidos pelas raízes e pelos estômatos e

o O₃ é absorvido pelos estômatos (FREEDMAN, 1995; PEDROSO, 2007). Já no interior da folha, o poluente ataca a clorofila, o que provoca a interrupção da fotossíntese, que é bem sensível aos poluentes, o que pode promover danos no crescimento da planta e até levá-la a morte (SEINFELD, 1986 *apud* TAVARES, 2005).

Os efeitos dos poluentes primários na vegetação em geral, são caracterizados pela redução da biomassa e crescimento da planta, além do aparecimento de necroses (morte celular) foliares. Já os poluentes secundários resultam na presença de cloroses (amarelecimento ou branqueamento) foliares (NALI, CROCICCHI e LORENZINI, 2004). Dependendo da concentração do poluente, os efeitos negativos na planta podem aparecer em curto ou longo prazo, como por exemplo, se o poluente apresenta baixas concentrações, os efeitos são a longo prazo, que incluem alterações metabólicas celulares, que afeta os processos de trocas gasosas como respiração e fotossíntese (TAVARES, 2005).

Os poluentes que estão depositados no solo, são absorvidos pela raiz, através da água e estes poluentes são transportados para todas as partes da planta e pode causar vários danos ao vegetal como por exemplo alteração no metabolismo da planta, alteração da nutrição e queda de folhas (RASCIO & NAVARI-IZZO, 2011).

Os efeitos que os poluentes podem exercer no ecossistema vegetal, vai desde alterações na sua estrutura física, declínio de espécies, empobrecimento do ecossistema, aparecimento de doenças até a supressão de uma espécie que seja sensível aos poluentes presentes no ar (STRUFFALDI-DE-VUONO, 1985).

2.6 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

O monitoramento do ar tem como objetivo a quantificação e o acompanhamento das concentrações dos poluentes. Uma rede de monitoramento pode ser montada pelos órgãos competentes de cada estado ou município e tem como objetivo: uma definição dos níveis de concentração de uma área; comparação dos resultados obtidos com a legislação vigente; elaboração de documentos; avaliação dos impactos das fontes de emissão na qualidade do ar; avaliação da correlação entre os poluentes e variáveis meteorológicas; e a avaliação das condições de operação, calibração e eficiência dos modelos de dispersão e dos equipamentos utilizados (OLIVEIRA, 2008). Um monitoramento bem feito com resultados tratados corretamente dá suporte para elaboração e avaliação de políticas e estratégias para o controle da poluição, gestão da qualidade do ar e saúde pública de acordo com as necessidades de cada município ou estado (SANTI, ROSA e SUZUKI, 2000; OLIVEIRA e FERREIRA, 2007).

As estações de monitoramento podem ser instaladas em pontos específicos, visando avaliar as condições daquele local em relação a uma fonte fixa específica ou nas proximidades das áreas com intenso tráfego, para avaliar a contribuição das fontes móveis ou ainda uma combinação destas fontes. A quantidade e a localização destas redes de monitoramento é em função do que se deseja acompanhar, como por exemplo, rua/avenida/rodovia, bairro, município ou região (ETI, 2000). Por isso, durante os estudos para instalação das redes, três perguntas devem ser respondidas: o quê, onde e quando; o quê é o poluente a ser medido e o meio para a coleta de dados; onde é a localização que será feita a amostragem e se será em um ponto ou vários; quando é a dimensão temporal, qual é o período da amostragem; respondendo estas três perguntas, a chance de sucesso para as redes de monitoramento é maior (SEWELL, 1978 *apud* ALVES, 2015).

Quando se responde a pergunta onde do parágrafo anterior, se fala da abrangência das redes de monitoramento, que pode ser desde uma área pequena, um bairro, um município, área rural ou até mesmo um país. Após a definição do local de estudo e do material que irá ser amostrado e analisado, é importante definir o tipo de equipamento que será usado para garantir um real retorno e atender aos objetivos do estudo. Os monitores de poluição atmosférica podem ser divididos em cinco tipos e a escolha de um deles deve levar em consideração os recursos disponíveis, modo de operação, operação e manutenção dos equipamentos (LACAVA, 2003). Os cinco métodos de monitoramento são: passivo, ativo, automático, sensor remoto e bioindicador.

Os amostradores passivos são utilizados para medir durante um período de tempo definido. Os equipamentos utilizam filtros com material absorvente para determinado poluente, normalmente gasoso, que posteriormente é analisado em laboratório (LISBOA e KAWANO, 2007). Os amostradores ativos são mais utilizados para MP e SO₂ e trabalha sugando um volume de ar por uma bomba onde o ar passa por um meio coletor, químico ou físico, por um período de tempo e depois é feita análise laboratorial (LISBOA e KAWANO, 2007). Os analisadores automáticos geram respostas com alto grau de precisão, mas exigem muito de operação, manutenção e controle de qualidade dos dados, além de sistemas e computadores específicos e exclusivos para trabalhar com este tipo de amostrador (LACAVA, 2003). Os sensores remotos são os mais recentes na linha de amostradores de poluentes e fornecem informações de concentração de poluentes distantes do local de amostragem, pela técnica de espectroscopia (LACAVA, 2003). Por fim, os bioindicadores são utilizados para verificar a ação dos poluentes nos seres vivos, sendo insetos e plantas os mais comuns para o

biomonitoramento ambiental. No quadro 2 é apresentada algumas vantagens e desvantagens desses amostradores.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos equipamentos de monitoramento dos poluentes atmosféricos.

Equipamento	Vantagens	Desvantagens
Passivo	Custo baixo; simples operação; dispensa energia elétrica; útil no mapeamento espacial da poluição.	Não há para todos os poluentes; fornece médias mensais ou semanais; exige trabalho de desenvolvimento e análise; resultados não são imediatos.
Ativo	Custo baixo; simples operação; dados confiáveis; histórico de dados.	Fornecer médias diárias apenas; exige coleta e análise em laboratório.
Automático	Variedade de poluentes; alta eficiência; dados horários; informação online.	Custo alto; complexo; exige mão de obra especializada; alto custo de manutenção.
Sensor remoto	Dados integrados espacialmente; útil para medir poluentes de fontes específicas; abrange vários poluentes.	Alto custo e complexidade; operação, calibração e validação difíceis; interferência das condições atmosféricas.
Bioindicador	Baixo custo; fácil operação.	Exige conhecimento em laboratório.

Fonte: WHO (1991) *apud* Lacava (2003).

Como mostrado nos parágrafos anteriores, os equipamentos utilizados nas estações podem combinar diferentes tipos de analisadores e amostradores de acordo com o objetivo do monitoramento e realidade técnica, social e econômica do local monitorado. O monitoramento pode ser realizado por qualquer instituição, seja ela privada ou pública e sempre pensando na possibilidade da integração dos dados, visando o bem-estar da população.

Para Curitiba e Região Metropolitana, o monitoramento da qualidade do ar é realizado pelo Instituto Água e Terra – IAT e teve início na década de 1980 com quatro estações, fixas e manuais, localizada uma em Curitiba e três em Araucária. Atualmente são oito estações, sendo três em Curitiba, quatro em Araucária e uma em Colombo, sendo que estas oito estações são fixas e automáticas. No Paraná, são mais seis estações automáticas distribuídas pelos municípios de Ponta Grossa, Paranaguá, Londrina, Maringá, Foz do Iguaçu e Cascavel, formando a Rede Estadual de Qualidade do Ar. Esta ampliação da rede para o estado teve início no ano de 2016. A figura 8 mostra a localização das estações em Curitiba e região metropolitana e a figura 9 mostra a rede da qualidade do ar no estado do Paraná.

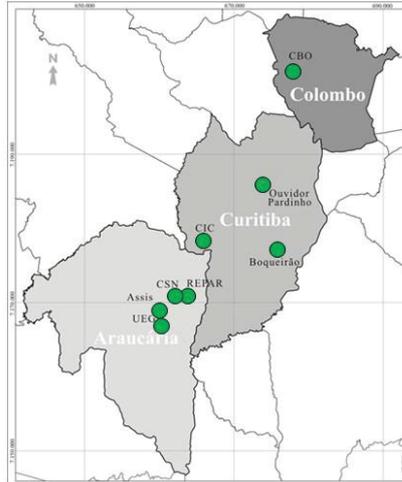


Figura 8 – Distribuição das estações em Curitiba e Região Metropolitana.
Fonte: IAT.

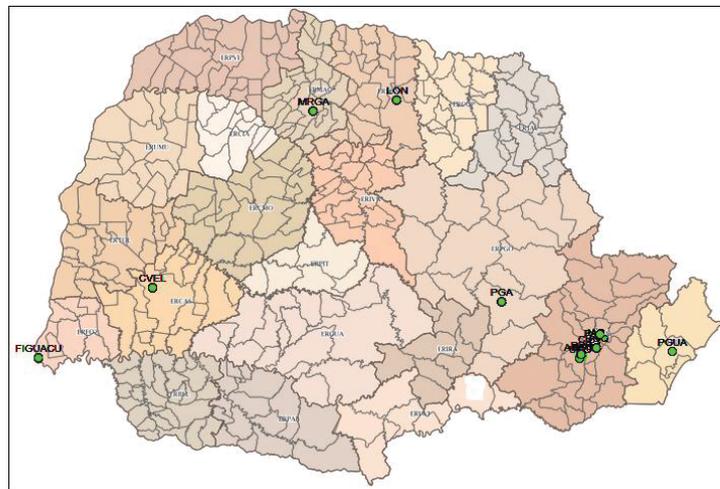


Figura 9 – Rede de monitoramento da qualidade do ar no Paraná.
Fonte: IAT.

2.7 SENSORES DE BAIXO CUSTO APLICADO AO MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

Sensores de poluentes de baixo custo estão atraindo cada vez mais atenção, pois oferecem monitoramento da poluição a um custo menor que os métodos tradicionais e podem ser utilizados em vários locais, complementando assim a rede de monitoramento de uma região. Estes sensores fornecem respostas rápidas e de fácil acesso, o que tem instigado grupo de pesquisas, setores privados entre outros a se concentrarem em desenvolver seus próprios programas para avaliar e utilizar os sensores (EUROPEAN COMMISSION, 2017; MORAWSKA *et al.*, 2018). Um ponto positivo dos sensores óticos de baixo custo é a sua capacidade de identificar pontos de *hot-spots* ou pontos críticos, o que permite uma investigação mais detalhada do local de monitoramento.

A aplicação destes sensores depende de outras tecnologias e conhecimentos, como programação e eletrônica. Estes sensores podem ser conectados com outros sensores ou componentes, micro controladores, microprocessadores, dispositivos de armazenamento entre outros (NASCIMENTO, 2016). Usando a tecnologia a nosso favor, uma das vantagens destes sensores é o acesso aos dados sem a necessidade de uma conexão física, além de poder formar um banco de dados e fazer o compartilhamento do mesmo (HILL *et al.*, 2004). Atualmente, dependendo de quanto está avançada uma rede de monitoramento de um local, já é possível ter acesso online sobre a qualidade do ar em tempo real (DEVARAKONDA *et al.*, 2013).

Apesar de ser uma solução barata e eficaz para monitorar a concentração de poluentes no ar, os órgãos ambientais ainda têm dificuldades em utilizar estes sensores devido a falta de uma normatização com relação ao seu uso. Para uma aplicação final, os sensores devem ser calibrados com equipamentos de referência, para que seus dados sejam válidos e possam ser usados amplamente (AGUIAR, 2014).

De uma maneira geral, os sensores são divididos em duas categorias, os que medem concentrações de gases e os que medem concentrações de partículas e todos eles são constituídos de alguns elementos básicos (LEITE, 2016):

- Sistema de aspiração;
- Elemento sensor propriamente dito que reage com o poluente de interesse;
- Transdutor que converte as respostas em sinais elétricos;
- Capacidade de armazenamento de dados ou envio via *wi-fi*; e
- Fonte de energia.

A grande maioria dos sensores disponíveis são baseados em dois princípios, os que dependem de interações entre o material de detecção ou semicondutor de óxido metálico e os componentes de fase gasosa e os que medem através da absorção de luz visível, infravermelho ou ultravioleta e para os sensores de material particulado, a medição pode ser feita por mudanças na frequência ou indiretamente através de dispersão luminosa (PAPROTNY *et al.*, 2013).

Os sensores de material particulado estão disponíveis no mercado ofertados por vários fabricantes com especificações muito parecidas, são pequenos e leves, baixo consumo de energia e podem custar entre US\$10 a 100 e sua faixa de medição se estende de alguns $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a cerca de $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ (RAI *et al.*, 2017). O quadro 3 traz alguns sensores disponíveis no mercado e suas especificações.

Quadro 3 – Sensores utilizados para medição de material particulado e suas especificações.

Modelo	Tamanho (mm)	Peso (g)	Fonte de alimentação	Consumo máximo de corrente	Custo (US\$)	Tamanho de partícula detectável	Faixa de medição de concentração
Alphasense OPC-N2	75 × 64 × 60	105	5 V DC	175	~ 500	0.38–17µm	0.1–1500µg/m ³
Dylos DC 1100 Pro	178 × 114 × 76	544	110 V AC	NA	~ 300	0.5–2.5µm e 0.5–10µm	0–106 partículas/cm ³
Dylos DC 1700	178 × 114 × 76	544	110 V AC ou bateria	NA	~ 400	0.5–2.5µm e 0.5–10µm	0–106 partículas/cm ³
Novafitness SDL301	204 × 100 × 36	580	5 V DC	NA	~ 250	0.3–2.5µm e 0.3–10µm	0–1000µg/m ³
Novafitness SDL607	73 × 73 × 20	120	5 V DC	NA	~ 120	0.3–2.5µm e 0.3–10µm	0–1000µg/m ³
Novafitness SDS011	71 × 70 × 23	NA	5V DC	80	~ 35	0.3–2.5µm e 0.3–10µm	0–1000µg/m ³
Novafitness SDS018	59 × 45 × 20	NA	5 V DC	70	~ 40	0.3–2.5µm e 0.3–10µm	0–1000µg/m ³
Novafitness SDS021	42 × 32 × 24	NA	5 V DC	70	~ 35	0.3–2.5µm e 0.3–10µm	0–1000µg/m ³
Novafitness SDS198	71 × 70 × 23	NA	5 V DC	80	~ 80	1–100µm	0–20000µg/m ³
Plantower PMS 1003	65 × 42 × 23	NA	5 V DC	120	~ 20	0.3–1.0µm, 1.0–2.5µm e 2.5–10µm	0–500µg/m ³
Plantower PMS 3003	65 × 42 × 23	NA	5 V DC	120	~ 20	0.3–1.0µm, 1.0–2.5µm e 2.5–10µm	NA
Samyoung DSM501A	59 × 45 × 20	25	5 V DC	90	~ 15	Maior que 1.0µm	0–1400µg/m ³
Sharp DN7C3CA006	50 × 44 × 20	52	5 V DC	180	~ 20	0.5–2.5µm	25–500µg/m ³
Sharp GP2Y1010AU0F	46 × 30 × 18	15	5 V DC	20	~ 10	Maior que 0.5µm	0–600µg/m ³
Shinyei PPD42NS	59 × 45 × 22	24	5 V DC	90	~ 15	Maior que 1.0 µm	0–28 partículas/cm ³
Shinyei PPD60PV	88 × 60 × 20	36	5 V DC	NA	~ 250	Maior que 0.5 µm	0–70 partículas/cm ³

Fonte: Rai *et al.* (2017) (traduzido).

*NA: Não disponível.

A maioria dos sensores citados no quadro 3 já foram utilizados em estudos de monitoramento de material particulado, como por exemplo, Olivares e Edwards (2015) realizaram monitoramento da fumaça advinda da queima de madeira; Zakaria *et al.* (2014)

mediram a concentração de MP dentro de uma fábrica de arroz durante o processo de descascamento; Rajasegarar *et al.* (2014) fizeram o monitoramento de fumaça de cigarro dentro de uma garagem; Olivares, Longley e Coulson (2012) monitoraram a concentração de MP durante as atividades domésticas e Steinle *et al.* (2015) utilizaram os sensores para monitorar atividades relacionadas a área urbana e rural. No trabalho de Baginski (2019), a autora fez um estudo comparativo entre três sensores de baixo custo de material particulado (Sharp GP2Y1010AU0F, Shinyei PPD42NS e SDS011), para analisar suas respostas diante de uma situação, sendo que o sensor SDS011 foi que o apresentou os melhores resultados, com mais consistência dos dados e desempenho.

No trabalho de Delgado *et al.* (2019), eles utilizaram o sensor SDS011 para medir a concentração de material particulado no interior de instalações de suínicas e avícolas, pois os poluentes atmosféricos acumulados e confinados nestas instalações podem afetar a saúde dos animais e funcionários. Já no trabalho de Prestes *et al.* (2018), eles realizaram experimento em laboratório utilizando sensores de baixo custo e compararam os resultados obtidos com equipamentos de elevada precisão e exatidão, sendo que os resultados se mostram satisfatórios estatisticamente tanto para concentração de MP_{2.5} e CO₂. O autor Nascimento (2016) utilizou uma sonda móvel composta por sensores de baixo custo para medir a concentração de MP e CO em algumas vias de Brasília-DF, instalando esta sonda em um automóvel e uma bicicleta, sendo que os resultados mostraram concentrações baixas, mas com picos diários, que podem ser prejudiciais a saúde da população e também se observou diferença entre as medições em dias úteis e finais de semana.

Há vários modelos de sensores de baixo custo para medir diversos tipos de poluentes, desde gases até particulados, portanto, para uma pesquisa ou projeto serem bem-sucedidos nos resultados, deve-se escolher o sensor que melhor se enquadra para o resultado que se espera. Por isso é importante realizar uma busca em artigos científicos, para verificar se existe algum teste realizado para determinar a acurácia e precisão do sensor, caso não exista é fundamental determinar os erros do monitoramento. Os sensores vieram para complementar as redes de monitoramento padrão já existentes em várias localidades mundo afora e também para aumentar a discussão entre a população acerca dos poluentes atmosféricos e qualidade do ar.

A tecnologia e uso dos sensores de baixo custo é muito recente, dificultando, muitas vezes, o seu uso por falta de informações, protocolos ou padrões, e isso reflete na calibração do equipamento, pois como não há um protocolo de calibração específico para esses sensores, os estudos disponíveis na literatura usaram métodos de calibração diferentes, o que dificulta

também, realizar comparações entre os resultados (RAI *et al.*, 2017). Ao se realizar a calibração de um equipamento, deve-se tomar cuidado com as operações, pois as condições de campo são diferentes de laboratório, por isso, deve-se sempre tentar calibrar o equipamento simulando as condições de campo ou no próprio local onde irá ficar instalado, pois isso pode impactar na resposta final do sensor. Outro ponto importante a ser considerado é a calibração individual dos equipamentos, pois mesmo sensores do mesmo tipo e marca podem ter respostas diferentes, mesmo em condições idênticas (OLIVARES *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2015; SOUSAN *et al.*, 2016).

Existem vários métodos que podem ser usados para a calibração dos sensores, como regressão linear, regressão multilinear, rede neural artificial, regressão de vetor de suporte entre outros, sendo os mais usados são a regressão linear e regressão multilinear (KARAGULIAN *et al.*, 2019). Uma calibração bem feita é a chave para uma implantação bem sucedida do sensor de baixo custo, embora ainda não haja um protocolo para isso, pesquisadores estão testando várias maneiras de se calibrar os sensores e disponibilizar a informação para o público em geral, para facilitar e agilizar o seu uso por todos (CLEMENTS *et al.*, 2017).

No trabalho de Chaves (2021) a autora fez uma comparação com o sensor SDS011 e equipamentos de referência como impactador *Harvard*, monitor de atenuação Beta BAM1020 e o instrumento de microbalança oscilante TEOM. Os resultados encontrados durante a comparação apresentaram variações que podem estar relacionados as condições específicas durante cada monitoramento. As correlações se mostraram diferentes para cada equipamento, onde foi encontrada uma correlação forte para o TEOM ($R^2=0,69$), moderada para o impactador *Harvard* ($R^2=0,47$) e fraca para o BAM1020 ($R^2=0,10$). Em uma análise de inter variabilidade entre os sensores SDS011, os mesmos apresentaram valores menores em comparação com os encontrados na literatura ($<9,64\%$), demonstrando com esses resultados que o sensor SDS011 se apresenta como uma boa alternativa de baixo custo para medições de MP.

Em Badura *et al.* (2018) os autores realizaram a comparação de quatro sensores de baixo custo com o analisador de referência TEOM. O sensor SDS011 foi um dos dois sensores que se mostraram melhores em termo de resultado e linearidade com o TEOM, com uma correlação entre 0,6 e 0,8, além de apresentar uma boa repetibilidade de resposta, sendo sugerido pelos autores a ampliação da rede de sensores para melhorar o estudo e a resolução espaço-temporal dos dados de MP.

Em Tagle *et al.* (2020) os autores usaram o sensor SDS011 como teste de campo durante o inverno e primavera em Santiago no Chile, e os resultados foram comparados com equipamentos de referência como o BAM 1020 e TEOM 1400. Os testes com o SDS011 se mostraram com baixa variabilidade e boa linearidade com os equipamentos de referência sendo que as correlações ficaram entre 0,47 a 0,86 em relação ao BAM e entre 0,24 a 0,76 para o TEOM, o que evidencia um bom desempenho por parte do SDS011.

Em Liu *et al.* (2019) os autores realizaram um estudo com três sensores SDS011 que foram instalados próximos a um equipamento de referência em Oslo, Noruega. Os resultados com os três SDS011 foram semelhantes, com correlação entre eles de 0,97 e demonstraram linearidade alta em comparação com o de referência variando de 0,55 a 0,71 evidenciando assim um bom desempenho. No geral, trabalhos realizados pela academia têm mostrado que os sensores de baixo custo para material particulado podem ser uma boa ferramenta para o monitoramento da qualidade do ar, como uma forma de ampliar os resultados disponíveis para a população.

Há ainda muito que ser trabalhado para que os sensores sejam normatizados e possam ser usados em larga escala, para que possam expandir o monitoramento da qualidade do ar, principalmente em países em desenvolvimento. A *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos, está trabalhando para facilitar o uso dos sensores de baixo custo para todos os cidadãos, para que estes possam instalar em suas residências, comércio, indústria entre outros e facilitar a comunicação destes com as agências ambientais de sua localidade e para que todos tenham proveito dessa “nova” fonte de dados de monitoramento de poluentes (SNYDER *et al.*, 2013).

A qualidade de medição e respostas destes sensores ainda não se compara as estações de monitoramento de referência, porém, se a qualidade for melhorada, os sensores de baixo custo poderão ter uma ascensão no monitoramento da qualidade do ar, podendo ser utilizados para vários fins, como o gerenciamento de tráfego, exposição pessoal, monitoramento do ar em países em desenvolvimento entre outros (EUROPEAN COMMISSION, 2017). Na gestão da qualidade do ar podem ser usados para complementar a rede de monitoramento, contribuindo para um controle maior das fontes de emissão e desta forma induzir a comunidade a um debate sobre o nível de exposição aos poluentes a que estão expostos e assim, cobrar dos órgãos competentes ações para diminuir a concentração destes poluentes (EPA, 2013).

2.8 BIOMONITORAMENTO

O biomonitoramento ambiental não trata sobre a quantificação de determinados poluentes, mas sim revela de forma qualitativa a reação do sistema biológico de microrganismos, plantas ou animais, usados como bioindicadores. Esta é a principal diferença entre um monitoramento físico, como sensores e estações de monitoramento, químico, em que analisa a composição do poluente detectado do monitoramento biológico ou biomonitoramento ambiental (MATSUURA, 2000). Assim, biomonitoramento é a resposta de organismos vivos usados para avaliar as mudanças ocorridas no ambiente, normalmente alterações de origem antrópicas, sendo que este conceito surgiu em 1866 com Nylander, que usou líquens como medida para verificar os efeitos da poluição do ar em organismos vivos (DE TEMMERMAN *et al.*, 2001; SOUZA e FONTANETTI, 2007).

As respostas que os organismos pertencentes a uma comunidade mostram diante de alterações ambientais têm sido estudadas pela ciência há tempos. As alterações morfológicas, fisiológicas, comportamentais e diversidade de uma comunidade podem ser entendidas como indícios que o ambiente sofreu alguma alteração além do limite tolerável para as espécies que compõem (SUTER, 2001; GERHARDT, 2002). Um dos registros mais antigos sobre o uso de uma espécie para monitoramento ambiental datado de meados do século XIX mostrou que canários foram colocados em minas de carvão para monitorar a qualidade do ar (BUSS, BAPTISTA e NESSIMIAN, 2003).

Entre os organismos bioindicadores existem plantas que respondem bem às alterações do ambiente. De acordo com Arndt, Nobel e Scwizer (1987) o termo “plantas indicadoras” apareceu em registros datados há mais de 400 anos e o primeiro reconhecimento impresso de danos causados por poluentes em plantas está descrito no livro de John Evelyn de 1661, ‘*Fumifugium*’ (DE TEMMERMAN *et al.*, 2001), porém o termo bioindicador começou a ser usado em meados da década de 1960 com o crescimento da literatura biológica alemã. Foi na Alemanha também, que o termo biomonitoramento começou a ser empregado, com o uso de vegetais no monitoramento da poluição do ar.

Dentro do estudo do biomonitoramento ambiental há algumas definições importantes a serem consideradas. Começando com os locais onde serão realizados os bioensaios, os bioindicadores podem ser organismos testes ou monitores (quadro 4). Sendo considerados os organismos testes quando usados em medições toxicológicas em laboratório, ou seja, ambiente interno para detectar riscos imediatos à população e seus resultados são reproduzíveis, já os monitores são usados para o monitoramento do nível de poluentes no

ambiente externo e sua repercussão no meio. Os monitores podem ainda ser divididos em passivo, quando pertence ao meio e ativo quando é introduzido no ambiente (MATSUURA, 2000; PAULA, 2010).

Nos bioensaios, os organismos podem ainda ser subdivididos como bioindicadores de exposição, de efeito ou de susceptibilidade dependendo de suas respostas (quadro 4). Sendo que os bioindicadores de exposição medem a dose real da substância ao qual ele está exposto; já os bioindicadores de efeito são representados por alterações bioquímicas, fisiológicas ou comportamentais e revelam alterações no organismo em qualquer tecido, órgão ou sistema; e por fim, os bioindicadores de susceptibilidade mostram capacidade herdada ou adquirida de um organismo em responder ao poluente (AMORIM, 2003).

Quadro 4 – Resumo dos bioensaios.

Local do Bioensaio	Teste	Interno:	Laboratório.
	Monitor	Externo:	Passivo: pertence ao meio. Ativo: introduzido no ambiente.
Resposta do bioensaio	Exposição	Mede a dose real da substância a que foi exposto.	
	Efeito	Apresenta alterações no organismo bioindicador.	
	Susceptibilidade	Capacidade do organismo em responder ao poluente.	

Fonte: A autora.

Estabelecidos alguns conceitos sobre o biomonitoramento, é necessário estabelecer o grupo de organismo mais eficiente para cada situação, que possam oferecer as respostas corretas para as questões. Para isso, é essencial conhecer a biologia e a dinâmica de cada organismo.

As características nutritivas e fisiológicas das plantas contribuem para seu uso como bioindicador, pois suas raízes absorvem sais e água que pode estar contaminada por substâncias tóxicas presentes no solo, água e ar (BAGLIANO, 2012). No quadro 5 temos alguns exemplos de bioindicadores que podem ser utilizados dependendo do meio que se está analisando.

Quadro 5 – Exemplos de bioindicadores usados em vários meios.

Meio	Bioindicador
Água	Protozoários, algas, peixes entre outros.
Ar	Leveduras, líquens, plantas entre outros.
Solo	Bactérias, fungos, invertebrados ente outros.

Fonte: Barbosa, 2013 (adaptado).

O uso de bioindicadores permite verificar o impacto da poluição em um ser vivo, integrar fatores externos como fatores climáticos e detectar estresse crônico mesmo em níveis baixos de poluição atuando por períodos prolongados (KLUMPP, 2001). Além de possuir

algumas vantagens, como atestar o impacto da poluição em um ecossistema diretamente sobre os organismos vivos, fornece informações sobre as causas e fatores observados, dados sobre um potencial risco para a flora, fauna e homem (KAPUSTA, 2008). Todavia, os bioindicadores não substituem os métodos físicos e químicos de monitoramento dos poluentes, e sim, um complemento para os estudos relacionados ao controle da qualidade do ar. E assim como o monitoramento físico já é assunto consolidado nas legislações vigentes referente a controle e monitoramento da qualidade do ar, mais estudos envolvendo bioindicadores devem ser realizados para que haja uma padronização do biomonitoramento ambiental e este possa ser incorporado nas legislações cabíveis (DE TEMMERMAN *et al.*, 2001).

2.8.1 *Tradescantia*

O interesse na utilização de plantas para monitoramento ambiental tem sido crescente e experimentos com diversos vegetais são descritos, sendo um exemplo quando se utilizou a *Vicia faba* (feijão) para experimento com exposição à radiação, em 1913 (READ, 1959).

Entre as plantas utilizadas como bioindicadoras, a *Tradescantia* apresenta fácil aclimação e se desenvolve durante todo o ano. Seu tamanho pequeno e código genético composto por seis pares de cromossomos, fazem desta planta um exemplar para estudos de biomonitoramento (CARVALHO, 2005). Pertencente à família Commelinaceae, o gênero *Tradescantia* compreende aproximadamente 500 espécies encontradas principalmente em áreas tropicais e subtropicais (WATSON e DALLWITZ, 1992). As inflorescências formadas na extremidade do caule podem ser compostas por mais de 50 botões que desabrocham diariamente e cada flor é composta por seis estames que possuem de 40 a 120 filamentos (pelos estaminais) e cada filamento pode conter de 25 a 35 células (ICHIKAWA, 1992; MA *et al.*, 1994).

O nome *Tradescantia*, é uma homenagem de Linnaeus em 1753, aos ingleses John Tradescant e seu filho, de mesmo nome. O pai foi um naturalista, viajante, jardineiro da nobreza inglesa e colecionador. Montou uma coleção de arte, história natural e etnografia com sementes e bulbos de espécies vegetais exóticas entre outros artefatos (SMALL, 1922). Já os primeiros estudos citogenéticos de *Tradescantia* datam de 1933 com Sax e Edmonds (MA e GRANT, 1982; RODRIGUES, 1999).

O gênero *Tradescantia* possui um grande número de espécies e as mais conhecidas são a *Tradescantia pallida* var. *purpurea* (Rose) D.R. Hunt e o clone 4430. Em 1960,

Sparrow produziu em laboratório o clone 4430, obtido pela hibridação entre *Tradescantia hirsutiflora* que possui flores azuis e *Tradescantia subacaulis* que possui flores rosas (SPARROW e SPARROW, 1976). A vantagem da utilização de plantas híbridas em relação a outras plantas não híbridas, é a redução na variabilidade das respostas e interpretação mais segura dos resultados (ALVES *et al.*, 2001; WHITE e CLAXTON, 2004). A figura 10 exemplifica os dois tipos de *Tradescantia* citadas anteriormente.



Figura 10 – Exemplos de *Tradescantia*. **A)** *Tradescantia pallida* var. *purpurea* (Rose) D.R..Hunt; **B)** *Tradescantia* sp. clone 4430.

Os ensaios mais utilizados para verificar anomalias nas *Tradescantias* podem ser divididos em três testes. O primeiro usa a ponta da raiz para verificar alguma aberração cromossômica em fase de mitose (MA, 1982); o segundo usa o pelo estaminal da flor, para verificar mutação que altera a cor das células do pelo estaminal de roxo ou azul para rosa (RODRIGUES, 1999); e terceiro analisa os grãos de pólen e verifica formação de micronúcleos em alteração meiótica (MA, 1982). Os dois últimos testes são os mais comuns de serem realizados e encontrados na literatura.

O teste de micronúcleo também é denominado de Trad-MCN foi padronizado por Ma e colaboradores em 1978, após as primeiras observações de micronúcleos para detecção de danos à meiose feita por Steinitz (1944) no laboratório Nacional Brookhaven, NY. Este ensaio (Trad-MCN) consiste na avaliação da frequência de micronúcleos formados a partir da quebra cromossômica em células-mãe de grãos de pólen em fase inicial de meiose quando expostas a agentes poluentes (MA, 1979).

O teste de pelo estaminal também é denominado de Trad-SHM, foi desenvolvido pelo Dr. Arnold H. Sparrow e colaboradores entre os anos 1950 e 1960 no Laboratório Nacional de Long Island, NY. O teste consiste na mudança de coloração do pelo estaminal heterozigoto (Aa) com predominância da cor azul ou roxa, que quando em contato com um agente tóxico sofre uma mutação que altera a sua cor para rosa, referente ao genótipo recessivo (aa). No teste Trad-SHM ainda é possível a observação de outras alterações como

células de tamanhos diferentes, células duplas ou triplas, bifurcação e anomalias de crescimento (SPARROW e SCHAIRER, 1971; MAZIVIERO, 2011).

As figuras 11 e 12 exemplificam o resultado obtido com os ensaios Trad-MCN e Trad-SHM, respectivamente.

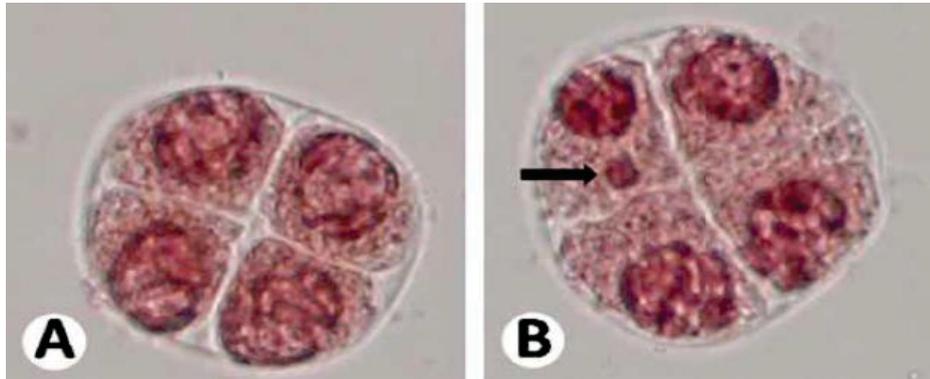


Figura 11 – Ensaio Trad-MCN. Tétrades de *Tradescantia pallida*. **A)** Sem micronúcleo (normal); **B)** Com micronúcleo (seta; com alteração).

Fonte: Souza, 2015.

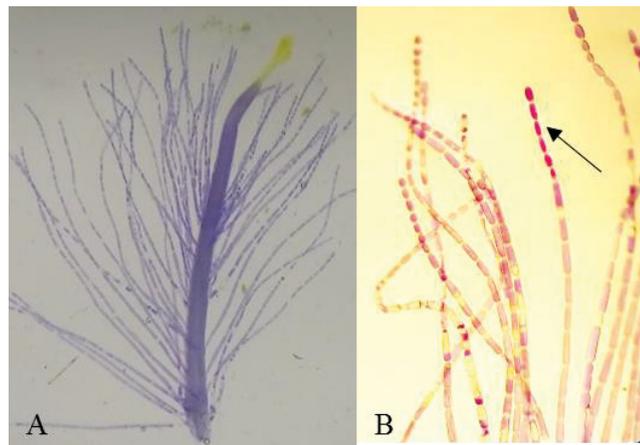


Figura 12 – Ensaio Trad-SHM. Mutação rosa em *Tradescantia*. **A)** Estame normal com a cor dominante azul (normal); **B)** Mutação nas células ciliadas na cor rosa recessiva (seta).

O ensaio Trad-SHM foi utilizado em campo em locais vizinhos às usinas nucleares do Japão, onde se observou que as mutações apareciam tanto com a direção dos ventos preferencial para estas localidades, quanto em períodos de intensa atividade das usinas (ICHIKAWA, 1981). Também foram detectadas alterações nos pelos estaminais em cidades distantes da localização do reator de Chernobyl, como por exemplo, em Cracóvia, distante 700km do local (CEBULSKA-WASILEWSKA, 1992). Porém, o ensaio Trad-SHM ganhou mais destaque quando foi aplicado em estudos de poluição atmosférica. Em bioensaios instalados nas cidades vizinhas onde localizavam-se refinarias de óleo e complexos petroquímicos, Lower *et al.* (1983) observaram alteração na cor dos pelos estaminais.

O ensaio Trad-MCN também foi utilizado para monitorar a poluição do ar, como o experimento de Ma, Anderson e Ahmed (1982) em Illinois – EUA, onde a *Tradescantia* foi exposta em vários locais públicos da cidade e durante a análise em laboratório foi verificado a presença de micronúcleos. Outro estudo feito por Ruiz *et al.* (1992) no México, foi avaliado a presença de micronúcleos nas flores expostas em uma área densamente industrializada, uma área residencial e outra mista, sendo que as plantas expostas na área industrial sempre apresentavam mais micronúcleos que nas demais áreas.

Os bioensaios com *Tradescantia* podem ser utilizados para monitorar agentes poluentes na água, no ar e no solo, sendo o mais comum o seu uso para verificar a qualidade do ar. No trabalho de Santos *et al.* (2019), eles utilizaram a *Tradescantia pallida* purpúrea e o bioensaio Trad-MCN para verificar a qualidade da água do Rio Tietê no município de Cabreúva-SP, comparando com o resultado com os controles realizados e após os testes realizados, constatou-se um número muito superior de micronúcleos em relação aos controles, constatando assim a baixa qualidade da água do rio, evidenciando assim a contaminação por dejetos industriais e domésticos que são despejados no rio de forma irregular. O teste Trad-MCN foi utilizado também nos estudos de Miyabe e Droste (2018) que evidenciaram a presença de micronúcleos quando fizeram o teste usando água com a presença de agentes tóxicos como Cádmio (Cd) e Chumbo (Pb) em concentrações máximas permitidas no CONAMA 357/2005. Foram utilizadas várias concentrações destes dois elementos químicos e os resultados apresentaram alterações nas tétrades quando as concentrações máximas permitidas foram ultrapassadas.

O trabalho de monitoramento da qualidade do solo após o uso de herbicida em cultura de cana-de-açúcar foi realizado por Régo (2017), que mostrou a aplicação da *Tradescantia pallida* (Trad-MCN) no estudo e os resultados mostraram que houve aparecimento de micronúcleos após a exposição da planta no solo contendo o herbicida, evidenciando sua sensibilidade ao agente poluente. Outro estudo realizado por Kong e Ma (1999), em amostras de solo e água em fazendas no Illinois, EUA, usando teste Trad-MCN e Trad-SHM para verificar se havia contaminação por pesticidas, mostraram mutações nos dois bioensaios, tanto para o solo, quanto para a água rasa coletada em poços.

Da mesma forma, Aghajanyan *et al.* (2019) estudaram a ação antropogênica no lago Sevan na Armênia através dos bioensaios com a *Tradescantia* e o estudo revelou mutações nos dois bioensaios, em comparação com o controle utilizado, evidenciando a contaminação da água por alguns elementos químicos estudados. Exemplares de *Tradescantia* sp. clone 4430 foram utilizados em bioensaios por Patussi e Bünchen (2013) para avaliar a

genotoxicidade de herbicidas em cultura de milho. Vasos contendo a planta foram colocados entre a plantação durante a aplicação do herbicida e depois foram analisadas em laboratório e o resultado mostrou que houve alteração mutagênica nos pelos estaminais em comparação ao controle, demonstrando a sensibilidade do bioindicador ao poluente e o risco que este pode causar para outros seres vivos.

O biomonitoramento ambiental é um importante aliado para o controle de agentes tóxicos presentes no ar, água e solo. O uso de bioindicadores tem se mostrado crescente devido ao seu baixo custo, facilidade de coleta, larga distribuição geográfica, fácil interpretação além da observação que os impactos de agentes poluidores têm nos seres vivos. Além disso, o biomonitoramento ambiental é uma importante ferramenta para a educação ambiental e conscientização da população referente a poluição do ar e ainda, é uma maneira de incentivar a redução das emissões dos poluentes e ter controle mais rigoroso das fontes poluidoras, sejam elas fixas ou móveis (MAKI, 2013).

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DOS LOCAIS DE ESTUDO

O estudo foi realizado em dois municípios – Curitiba e Araucária – que estão localizados na região leste do Estado do Paraná (figura 13). A população estimada para Curitiba é de 1.948.626 e Araucária de 146.214 habitantes. (IBGE, 2020). As principais atividades econômicas destes dois municípios são o comércio e a indústria, além de possuírem juntas, uma frota de aproximadamente 1.539.491 veículos, o que contribui para a liberação de materiais particulados e gases no ambiente interferindo desta maneira na qualidade do ar, na saúde pública e ao bioma local (IPARDES, 2019).

Segundo a classificação climática de Köppen, os municípios possuem clima Cfb (Clima temperado propriamente dito), com chuvas bem distribuídas, verão brando, ocorrência de geada (outono e inverno), temperatura média abaixo de 20°C (exceto verão) e sem estação seca definida (NITSCHKE *et al*, 2019).

3.2 DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DO MONITORAMENTO ATIVO DO BIOINDICADOR E SENSOR SDS011

O bioensaio com os vasos com *Tradescantia* sp. clone 4430 e a coleta de MP com o sensor SDS011 foram conduzidos no perímetro urbano de Curitiba e Araucária, totalizando oito pontos, onde houvesse acesso a energia elétrica e local seguro. Assim, os pontos escolhidos estão listados no quadro 6 e identificados na figura 13. O ponto de controle negativo, foi realizado na estação Botânico, para os dois ensaios. Em cada ponto amostral foi instalado um sensor ótico SDS011 com o microcomputador *Raspberry Pi* e cinco vasos contendo aproximadamente três mudas da planta *Tradescantia* sp. clone 4430.

Quadro 6 – Pontos de amostragem para Curitiba e Araucária.

Número	Estação	Localização
1	BATEL	Bairro Batel
2	MERCES	Bairro Mercês
3	BOTANICO	Bairro Jardim Botânico
4	JDAMERICAS	UFPR, ao lado do LACTEC, no container do Laboratório de Ecologia e Conservação (LEC)
5	BVISTA	Bairro Boa Vista
6	ORLEANS	Bairro Orleans
7	GUAIRA	Bairro Guaira
8	ARAUCARIA	Bairro Estação, município de Araucária

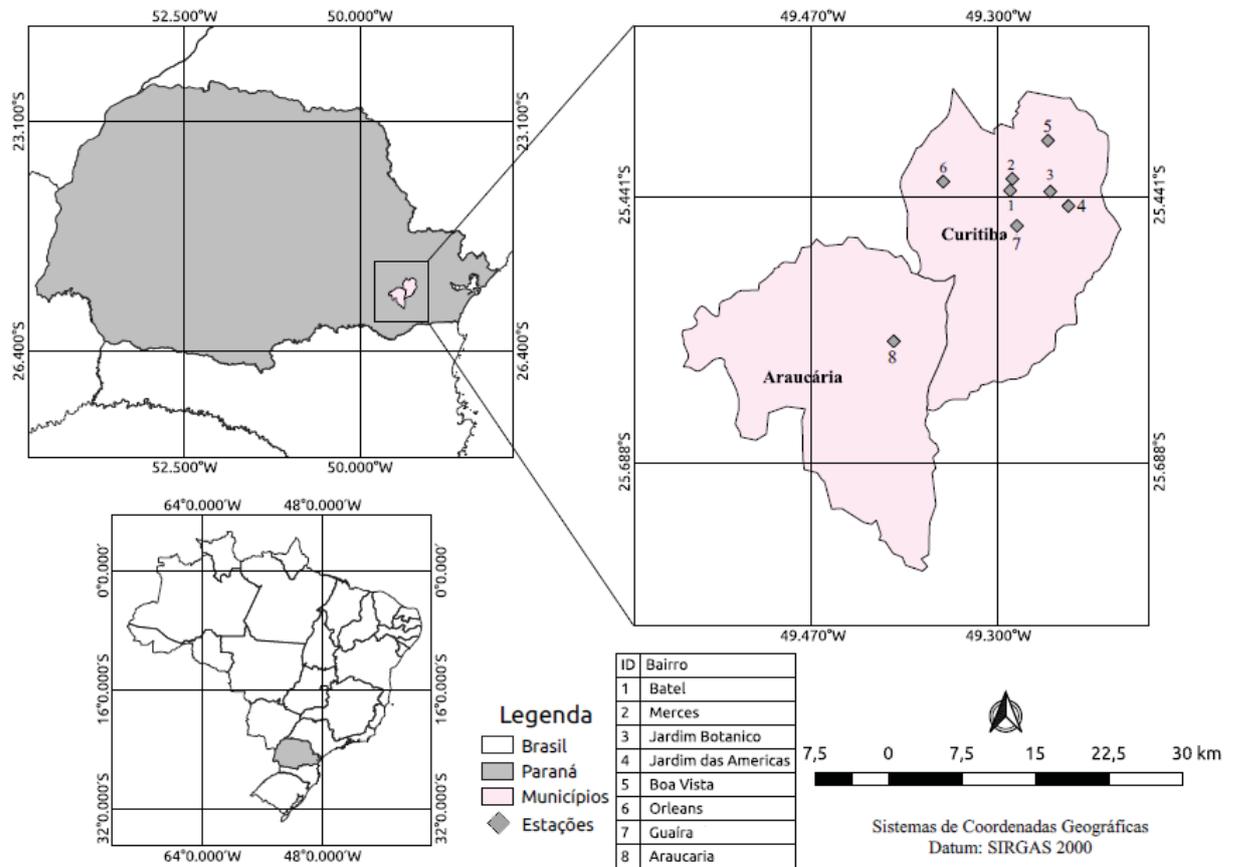


Figura 13 – Localização dos municípios e pontos estudados (estações).

Para realizar o controle negativo do material particulado, foi utilizado outro sensor SDS011 e este foi colocado dentro de uma caixa de acrílico com uma pequena abertura para a passagem do cabo USB (fonte de energia e transferência de dados), e esta caixa foi fechada com papel filtro, para que não houvesse a entrada direta de ar dentro da caixa, sendo que o orifício feito para a passagem do cabo também foi vedado. Para as *Tradescantias*, os vasos foram dispostos dentro de uma caixa plástica e a parte superior também foi fechada com papel filtro.

Nesta pesquisa usou-se o filtro de café para fazer o isolamento do sensor com o ambiente externo. Este filtro, por ser da indústria alimentícia, ele é estéril e possui uma gramatura intermediária. Na figura 14 está representado microscopicamente as fibras finas e as tramas mais densas de um filtro de café de celulose (MIRANDA, 2020).

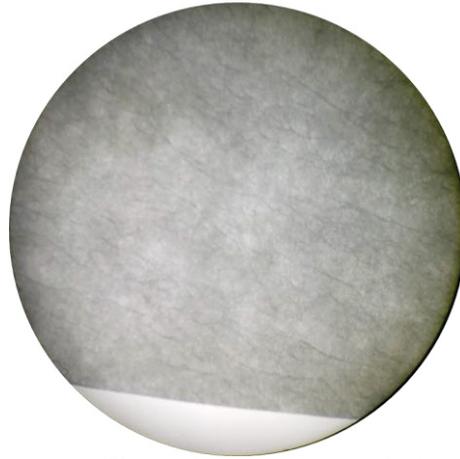


Figura 14 – Filtro de café de celulose, com fibra mais fina e trama mais densa.

De acordo com o Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar (BRASIL, 2020), é importante manter registros dos locais de monitoramento com suas caracterizações, sendo que atualizações devem ser feitas quando necessário. Os quadros no Anexo A são uma adaptação da CETESB (2007), disponível no Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar.

3.3 RASPBERRY PI E SENSOR SDS011

O *Raspberry Pi* é um minicomputador, compacto e possui todos os principais componentes de um computador em uma pequena placa. Este dispositivo foi criado no Reino Unido pela fundação *Raspberry Pi*, uma organização sem fins lucrativos com foco no ensino de ciência da computação nas escolas e universidades (RASPBERRY PI FOUNDATION). O modelo utilizado para este trabalho foi o *Raspberry Pi 3 Model B+* (figura 15.A).

O sensor SDS011 (figura 15.B) é um equipamento de baixo custo desenvolvido por uma universidade da China, e faz leitura de $MP_{2.5}$ e MP_{10} , com uma faixa de medição entre 0.0 e $999.9\mu g/m^3$ com um tempo de resposta de 1 segundo e se caracteriza pela estabilidade ao longo do tempo. O princípio de funcionamento do sensor é através do espalhamento a laser, onde a dispersão da luz pode ser induzida quando partículas passam pela área de detecção e a luz dispersa é transformada em sinais elétricos que serão amplificados e processados (NOVA FITNESS, 2015). Este sensor é calibrado pelo próprio fabricante e possui certificação CE/FCC/RoHS e seu certificado pode ser visualizado no Anexo B, bem como seus certificados de verificação e conformidade, que estão disponíveis no site da empresa, junto com as especificações técnicas (NOVA FITNESS).

Portanto, para este estudo não foi realizada uma calibração do sensor SDS011 e sim a calibração realizada pela fábrica, pois o objetivo do trabalho não foi verificar o erro padrão, a precisão e acurácia do sensor e sim, as variações de concentração de material particulado coletado em cada ponto de monitoramento.

Em todos os locais de estudo foi montado o conjunto *Raspberry Pi* e sensor SDS011 (figura 16). O SDS011 foi instalado preferencialmente nas áreas externas, em local protegido contra intempéries para não danificar seu sistema elétrico. Em alguns casos foi utilizada uma caixa plástica para encaixar o sensor, com um orifício para deixar a entrada de ar livre para a coleta do material particulado, e foi montado na posição horizontal, conforme recomendação do fabricante (figura 17). Foi desenvolvido um script em linguagem *Python* para a coleta dos dados de material particulado através do sensor. Este script foi programado para fazer as leituras das medições a cada cinco segundos e ser salvo em arquivo .txt para posterior tratamento e análise dos dados (Apêndice A). Foi desenvolvido também um código para a transmissão destes dados via *wi-fi* para o dropbox (Apêndice B).

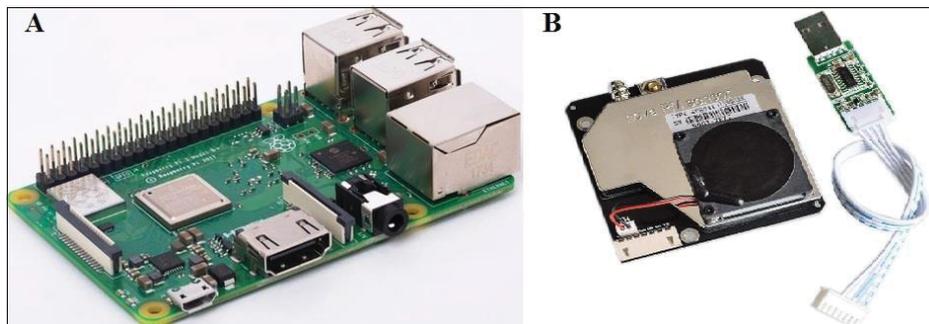


Figura 15 – A) *Raspberry Pi* 3 Model B+; B) Sensor SDS011.



Figura 16 – Conjunto *Raspberry Pi* + Sensor SDS011.

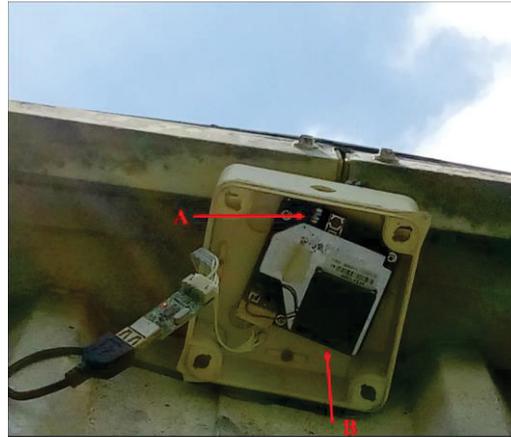


Figura 17 – Montagem do SDS011 indicada pelo fabricante (horizontal); **A)** Entrada de ar e do MP; **B)** Saída de ar (ventilador). Local de instalação: Bairro Jardim das Américas.

Em alguns locais do monitoramento foi instalado um monitor LCD de 3.5" no *Raspberry Pi* como interface com o usuário, já em outros locais um monitor de PC pode ser conectado ao processador como meio de comunicação. Um esquema desta estrutura pode ser observado na figura 18.

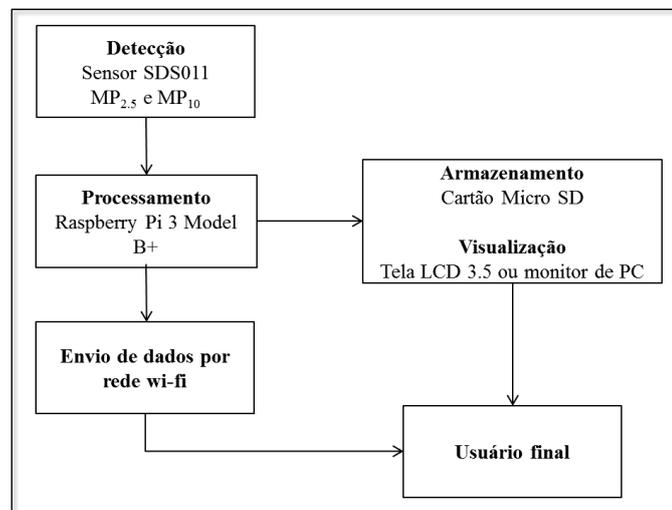


Figura 18 – Estrutura do sistema de medição.

3.4 *Tradescantia* sp. clone 4430

Foram cultivadas plantas de *Tradescantia* sp. clone 4430 em vasos de polietileno contendo substrato comercial. Os vasos foram inicialmente mantidos em laboratório e regados semanalmente. A exposição em campo foi realizada nos oito locais determinados no final do ano de 2019, sendo dispostos cinco vasos, em cada local com a planta, expostos as condições naturais do ambiente (figuras 19 e 20), e as regas ocorriam semanalmente, sendo que a cada

quinze dias era usado um adubo a base de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), misturado na água e seguindo as recomendações da embalagem para a quantidade de água e tamanho dos vasos. A manutenção das plantas ficou sob os cuidados dos voluntários desta pesquisa, onde foram instaladas as flores.



Figura 19 – Vasos com as mudas de *Tradescantia* sp. clone 4430.



Figura 20 – Vasos com *Tradescantia* sp. clone 4430 em um dos locais de amostragem (Bairro Mercês).

3.5 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DAS FLORES E PREPARO DAS LÂMINAS EM LABORATÓRIO

Os procedimentos de ensaio Trad-SHM aqui utilizado foi uma adaptação de Rodrigues (1999). As flores da *Tradescantia* sp. clone 4430 foram programadas para serem coletadas semanalmente a partir de janeiro de 2020 até fevereiro de 2021 e em cada coleta foram retiradas todas as flores, cortando seu pedúnculo. Após o corte, os ramos foram identificados conforme o seu ponto de coleta e levados para o Laboratório de Engenharia Ambiental – LEA2, UFPR, Centro Politécnico. As flores foram coletadas no período da

manhã, porque no decorrer do dia ela se fecha e murcha. Caso a avaliação não fosse possível no mesmo dia da coleta, foram adotados dois procedimentos, o primeiro as flores eram coletadas e mantidas refrigeradas em potes com tampa e com papel filtro umedecido e sendo analisadas em até 24h após a colheita, e o segundo foi a coleta das flores e a retirada dos estames com o auxílio de uma pinça e feita a montagem das lâminas, tomando o devido cuidado para deixar os pelos estaminais alinhados na lâmina; foi utilizado uma fita adesiva para fazer a aderência da lamínula na lâmina, para evitar a perda do material e para identificar o local e a data da coleta; estas lâminas prontas também foram mantidas em refrigeração até a análise, preferencialmente em até 24h (RODRIGUES, 1999).

Para a montagem das lâminas, foram utilizadas todas as flores coletadas de cada ponto e destas retirados seis estames com o auxílio de uma pinça, sendo dispostos em lâminas. Para fixação do material biológico foi usado a solução de 1:1 de álcool 70% e glicerina. Com o auxílio de uma pinça e uma agulha, os pelos foram alinhados na lâmina e observados em Lupa. Em seguida, foi sobreposta uma lamínula e o material foi analisado com o auxílio de Microscópio Óptico. Foram contabilizadas todas as células rosa presentes no pelo estaminal e também o total de pelos estaminais contidos no estame. Caso não houvesse uma célula rosa no pelo estaminal observado, foi contabilizado somente o número total de filamentos (pelo estaminal).

Cada flor contém seis estames e cada estame possui entre 40 a 120 pelos estaminais e cada pelo estaminal é composto por 25 a 35 células que são derivadas por mitose, sendo que a maioria das células rosa ocorre no estágio inicial do desenvolvimento do pelo estaminal (ICHIKAWA, 1992; MA *et al.*, 1994). A frequência de mutações por flor foi então expressa em número de eventos/1000 pelos estaminais. Um evento mutagênico consiste em uma ou uma sequência de células rosa adjacente, entre as células dominantes azuis em qualquer posição no pelo estaminal (UNDERBRINK, SCHAIRER e SPARROW, 1973; ICHIKAWA, 1981).

A figura 21 ilustra o aparecimento de mutações rosa e suas possíveis localizações no pelo estaminal e outras mutações que podem ser observados durante as análises. A figura 22 representa a sequência da análise da flor, com o preparo da lâmina e visualização na lupa e microscópio. A figura 23 está identificando cada parte da *Tradescantia* sp. clone 4430.

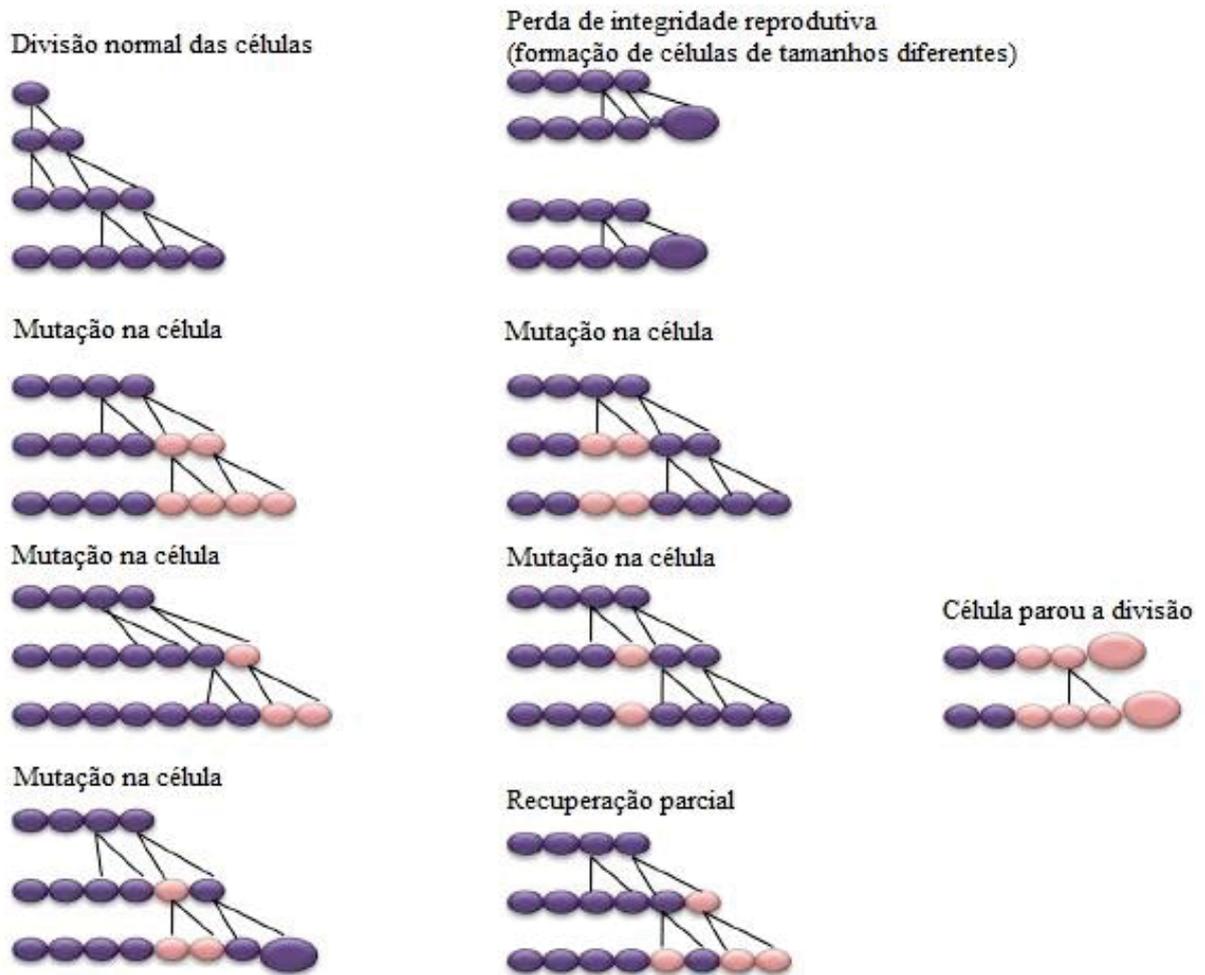


Figura 21 – Ilustração das mutações que podem ser observadas no ensaio Trad-SHM.
Fonte: Ichikawa (1981); Maziviero (2011).

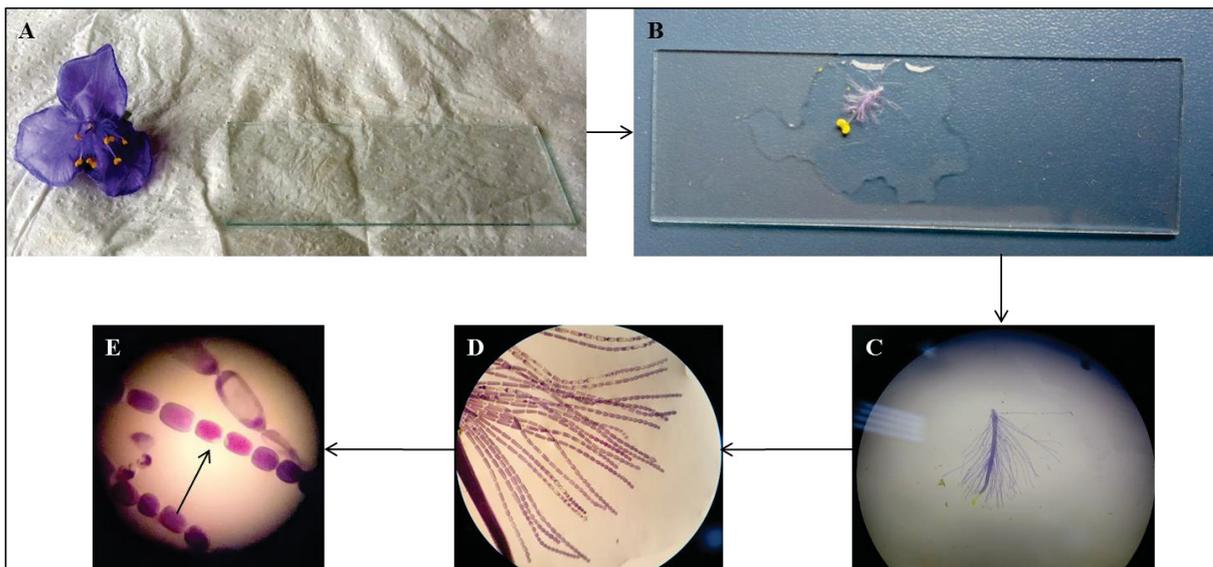


Figura 22 – Sequência de análise da *Tradescantia* sp. clone 4430.
 A) Flor e lâmina; B) Estame na lâmina com solução 1:1 de álcool 70% e glicerina; C) Estame e pelos estaminais vistos através da lupa; D) Pelos estaminais e células vistos através do microscópio com aumento de 4x; E) Células rosa (seta) vistas pelo microscópio com aumento de 10x.

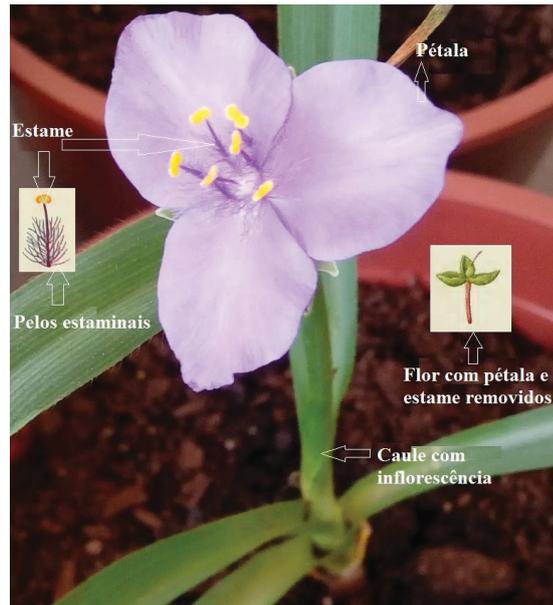


Figura 23 – *Tradescantia* sp. clone 4430 e suas principais partes.
Fonte: A autora; Small (1922).

Durante as análises, foram observadas diferentes tipos de mutação ou aberração, como descreve Underbrink *et al.* (1970) e Underbrink, Schairer e Sparrow (1973). No trabalho de 1970, Underbrink *et al.* fizeram um diagrama exemplificando um pelo estaminal normal e tipos de células com aberrações mais observadas durante um experimento com Raio-X, este diagrama pode ser observado na figura 24. No trabalho de Underbrink, Schairer e Sparrow (1973), os autores comentam que essas alterações além de serem observadas após exposição a Raio-X, elas foram observadas quando as flores foram expostas a um poluente químico gasoso ou na presença de um agente químico na água em que a planta estava sendo usada como bioindicador.

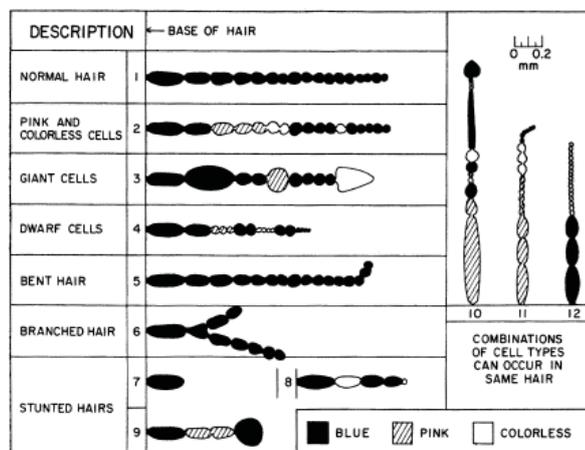


Figura 24 – Diagrama de um pelo estaminal normal de *Tradescantia* e exemplos de aberrações que podem ser observadas.
Fonte: Underbrink *et al.* (1970).

O início, a quantidade e a frequência de coleta das flores variou de ponto a ponto, pois durante o tempo de amostragem algumas plantas demoraram mais para se aclimatar ao local, outras precisaram ser substituídas e com isso levou mais um tempo para a aclimação, outras produziram menos flores em comparação com as demais e o intervalo de uma semana entre as coletas também ocasionou a perda de flores devido a sua rápida floração e o tempo que as flores permanecem abertas, sendo que situação semelhante ocorreu nos trabalhos de Lau (2002) e André (2007), onde os mesmos relataram dificuldades no início do trabalho devido a aclimação do clone 4430 ao ambiente até a obtenção das flores para as análises.

3.6 TRATAMENTO DOS DADOS DO SENSOR SDS011

Para o tratamento dos dados coletados, foi desenvolvido um script em linguagem *Python* para fazer a leitura dos arquivos em .txt, realizando a média por minuto dos dados e convertê-los em .csv (Apêndice C). Com o arquivo .csv pode-se fazer as análises dos dados das mais diversas formas. Para este trabalho, foram feitas médias horárias e diárias para as concentrações de material particulado, e posteriormente foram gerados gráficos das concentrações ao longo do tempo.

3.7 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Foram realizados testes para verificar a normalidade e a homogeneidade dos dados disponíveis e os testes escolhidos foram o Shapiro-Wilk (SW) para a normalidade e o Levene para a homogeneidade, ambos com nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$). Se o p-valor do teste for menor que o nível de significância de 5%, rejeita-se a hipótese de normalidade e homogeneidade e aceita que os dados não seguem uma distribuição normal e são heterogêneos. Entende-se como distribuição normal ou gaussiana, quando o gráfico da distribuição de frequência dos dados retorna uma curva com formato de sino e simétrica em torno de seu ponto médio. A homogeneidade dos dados é determinada pela distribuição igual entre os dados dos pontos de interesse.

Para o caso não aceitação da hipótese de normalidade, usou-se o teste de Kruskal-Wallis (KW) e para a aceitação da hipótese de normalidade, usou-se a ANOVA. Tanto Kruskal-Wallis quanto a ANOVA verificam se há diferença estatística entre os dados. Para um nível de significância de 5%, rejeita-se a hipótese de os dados serem iguais

estatisticamente para um $p\text{-valor} < 0,05$ e aceita-se que pelo menos um grupo de dados é diferente dos demais.

Se a hipótese de igualdade entre os dados for rejeitada, sabe-se que pelo menos dois grupos apresentam diferença. Para determinar quais desses grupos são diferentes, seguiu-se a análise de *post-hoc* utilizando o teste de Nemenyi ou o teste de Dunn para a análise de Kruskal-Wallis e o teste de Tukey para a ANOVA. Com o nível de significância de 5%, rejeita-se a hipótese de os pares não serem diferentes entre si para um $p\text{-valor} < 0,05$. Estes testes foram utilizados para analisar os dados do ponto de controle, tanto de material particulado como de mutações, assim como os dados de MP e Trad-SHM dos demais pontos.

A hipótese nula (H_0) para este trabalho foi definida de que não há diferença entre a frequência de mutação em pelo estaminal e a concentração de material particulado MP_{10} e $MP_{2.5}$. A hipótese alternativa (H_1) é que exista pelo menos uma variável que impacte na frequência de mutação em pelo estaminal.

Outra análise realizada entre material particulado e mutações em pelo estaminal foi a correlação de Spearman (r) que permite determinar de qual é a intensidade da relação que existe entre duas variáveis e para interpretação do valor (r positivo ou negativo) foi usado os seguintes valores (SHIMAKURA, 2006):

- 0,00 a 0,19 – correlação bem fraca;
- 0,20 a 0,39 – correlação fraca;
- 0,40 a 0,69 – correlação moderada;
- 0,70 a 0,89 – correlação forte; e
- 0,90 a 1,00 – correlação muito forte.

Ressalta-se que o coeficiente de correlação não explica a causalidade entre uma variável e outra, pois ambas as variáveis podem sofrer influência de outras variáveis que possam interferir nesta correlação.

Para realizar a correlação entre o número de mutações em pelo estaminal e a concentração de material particulado, foi realizado um cálculo para encontrar o período de tempo de exposição da planta que resultava em um maior número de mutações. Esse estudo mostrou quantos dias de exposição a planta precisa ter para apresentar uma resposta às concentrações de poluentes atmosféricos aos quais ela estava exposta. Este cálculo foi feito com o auxílio do programa na linguagem *Python* (Apêndice D), e foram usados os dados coletados durante a pesquisa, sendo usado como base as datas de coleta das flores *Tradescantia* sp. clone 4430. Para os dados de MP, foram calculadas médias diárias e após

este cálculo foi realizada uma correlação entre os dados de mutações/1000 pelos estaminais e as médias de N dias para concentrações atmosféricas, para encontrar a melhor correlação entre estas variáveis. Este cálculo foi feito para todos os pontos de monitoramento e com os dados de MP₁₀ e MP_{2.5}, com isso, foi encontrado o valor de 18 dias, ou seja, em uma linha temporal retrógrada contando da data de coleta da flor, durante 18 dias o botão da flor ficou exposto ao poluente atmosférico e os “absorveu”, aparecendo assim as mutações em pelo estaminal quando da abertura do botão e coleta da flor. A figura 25 representa esta análise temporal e o período de melhor correlação para MP₁₀ e MP_{2.5}. Demais figuras referentes a esta análise estão apresentadas no Apêndice E.

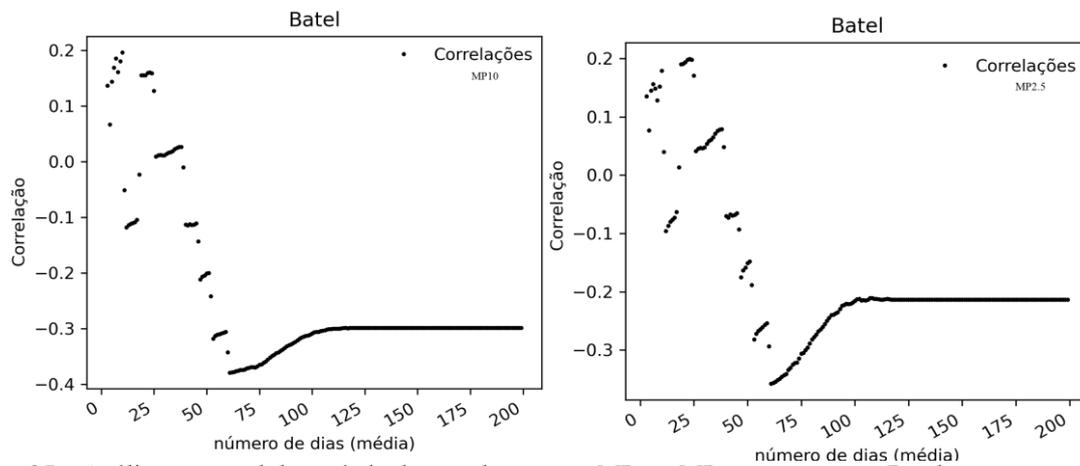


Figura 25 – Análise temporal do período de correlação para MP₁₀ e MP_{2.5} para o ponto Batel.

Na literatura este valor variou entre 10 a 21 dias para uma exposição crônica contínua, ou seja, após este período foram encontrados os maiores valores de mutações nas flores analisadas. Nos trabalhos de Takahashi e Ichikawa (1976), Ichikawa (1981) e Ichikawa *et al.* (1996), com experimentos em exposição a taxas de radiação, foi observado que as mutações eram mais frequentes quando expostas aos fatores ambientais cerca de duas ou três semanas antes da floração. Já na pesquisa de Yamashita (1976), também realizando experimentos de exposição à radiação, em exposição crônica, as mutações atingem um valor constante após 17 dias do início da exposição da radiação. No trabalho de Schairer *et al.* (1978) foi comentado que a resposta da *Tradescantia* sp. clone 4430 a uma exposição crônica de radiação pode ser uma importante comparação com os poluentes atmosféricos, pois a maioria das exposições a estes poluentes são de ordem crônica, sendo que a sensibilidade máxima do pelo estaminal apareceu após cerca de três semanas de exposição à radiação. O autor comenta ainda que certas curvas obtidas através do estudo do efeito radiação no pelo estaminal podem ser usadas como padrões de comparação para agentes químicos. Ainda no

trabalho de Schairer *et al.* (1978), estes realizaram um teste com *Tradescantia* clone ao expor a planta a fontes de poluentes industriais em várias localidades, em exposição de duas semanas, e os resultados se mostraram equivalente a uma exposição crônica de radiação e quando a frequência de mutação foi comparada com o grupo controle, foi observada uma diferença estatística significativa com um aumento de mutações em até 31%.

A figura 26 representa esta análise estatística descrita anteriormente de maneira mais visual. Para a aplicação de todos os testes descritos foram utilizados códigos desenvolvidos nas linguagens *Python* e *R*.

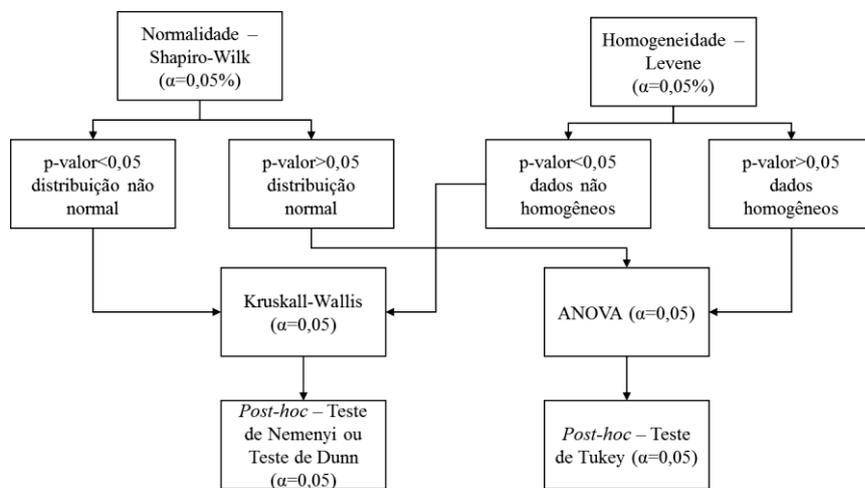


Figura 26 – Rotina da análise de dados para MP e Trad-SHM.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com as medições de material particulado com o sensor SDS011 e o biomonitoramento com a *Tradescantia* sp. clone 4430. Primeiro foram apresentados os resultados obtidos das médias diárias de MP₁₀ e MP_{2.5} e as frequências de mutação para a *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto de controle. Após foram apresentados os resultados das frequências de mutação do bioensaio Trad-SHM para os oito pontos de monitoramento. Na sequência estão os resultados das médias diárias de material particulado MP₁₀ e MP_{2.5} para os oito pontos de estudo.

Após estas análises, são apresentados os resultados da comparação entre concentração de MP e frequência de mutação em pelo estaminal para os oito pontos.

As estatísticas apresentadas seguem sempre a sequência do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (SW), teste de heterogeneidade de Levene, teste de Kruskal-Wallis (KW) e teste de *post-hoc* de Nemenyi, com os resultados do p-valor com nível de significância de 5%. Por fim, são apresentados os valores da correlação de Spearman (r).

4.1 MATERIAL PARTICULADO E TRAD-SHM – PONTO DE CONTROLE

As coletas de dados de material particulado e de flores da *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto de controle negativo começaram na metade do mês de novembro de 2020 e foram até o começo de março de 2021. Nas figuras 27 e 28 são apresentados os gráficos referentes às análises de mutações em pelo estaminal e coletas de MP.

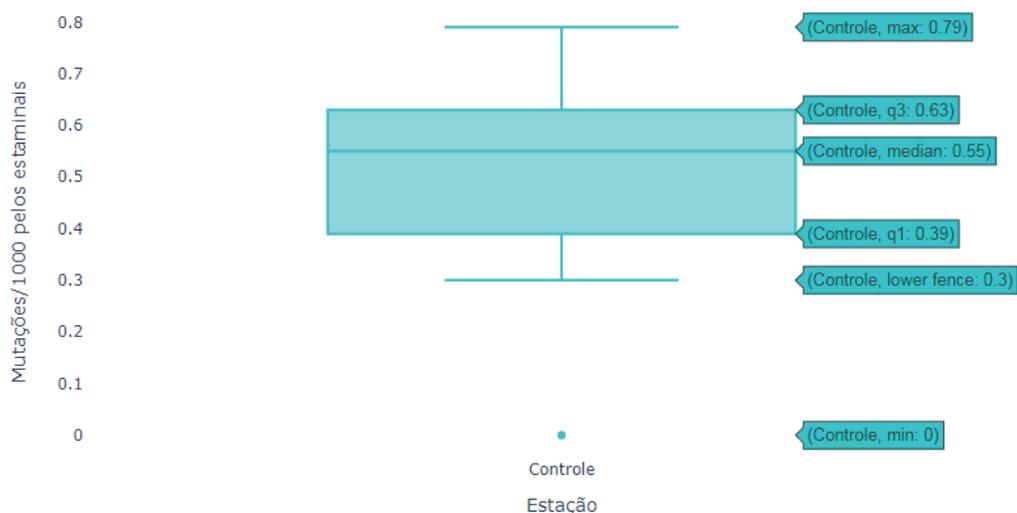


Figura 27 – Boxplot referente as mutações em pelo estaminal do ponto de controle.

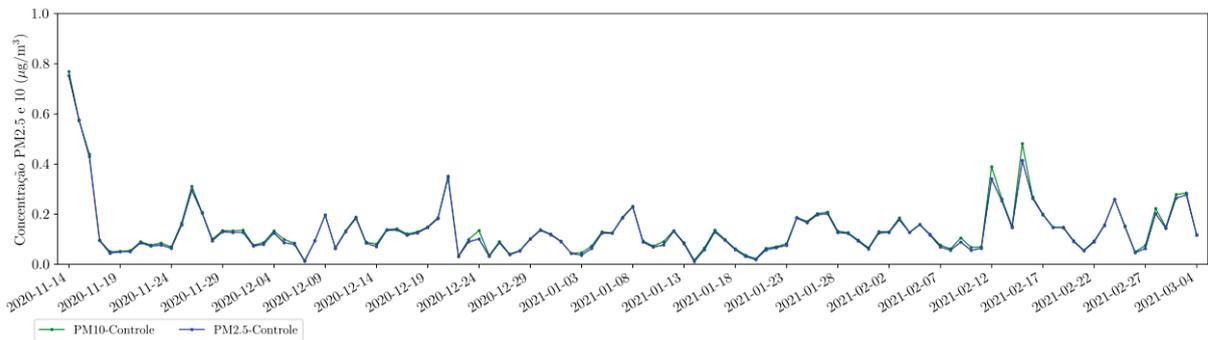


Figura 28 – Gráfico das médias diárias para MP₁₀ e MP_{2.5} do ponto de controle.

Na figura 27 observa-se a presença de mutações em pelo estaminal, mas a frequência foi baixa, que pode ser considerada resultante de mutações espontâneas que podem ocorrer mesmo quando a planta está mantida em ambiente não poluído (UNDERBRINK, SCHAIRER, SPARROW, 1973; PEREIRA, CAMPOS JÚNIOR, MORELLI, 2013). Em algumas coletas obteve-se zero mutações. Ainda neste gráfico nota-se que a mediana ficou mais próxima do terceiro quartil, apresentando assim uma assimetria negativa, já que a média ($0,4958 \pm 0,21$) ficou menor que o valor da mediana (0,55), ou seja, os dados possuem uma tendência a ficarem mais concentrados na parte superior do *boxplot*. Apesar de terem sido encontrados mutações no ponto de controle, a frequência deste foi pouco variável ao longo das coletas, com resultados similares aos observados por Savóia (2007) e Costa *et al.* (2015). Já na figura 28 as concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5} não passaram de $1\mu\text{g}/\text{m}^3$, em alguns dias chegaram a ser zero e as duas medições ficaram muito próximas, onde ocorre até a sobreposição das curvas. As caixas onde ficaram o sensor e as flores foram higienizadas antes da montagem dos experimentos, para evitar uma possível contaminação e leitura errada do equipamento. Porém, observamos que algumas partículas ainda foram detectadas pelo sensor, podendo até ser alguma partícula que se soltou do próprio papel filtro usado para isolar o sistema do ambiente externo ou até mesmo de pequenas partículas que conseguiram passar pelas tramas do filtro.

Aplicado os testes estatísticos para verificar se os dados seguem uma distribuição normal e se são homogêneos. A tabela 4 mostra o p-valor para o teste de normalidade (Shapiro-Wilk) para os dados de material particulado e frequência de mutação em pelo estaminal para o ponto de controle.

Tabela 4 – Resultados do p-valor para teste de normalidade – Controle.

Teste	TradC	MP ₁₀ C	MP _{2,5} C
Shapiro-Wilk	0,02664	0,00609	0,01631

Obs: TradC – frequência de mutação em pelo estaminal do ponto de controle;
 MP₁₀C – média diária de MP₁₀ do ponto de controle; e
 MP_{2,5}C – média diária de MP_{2,5} do ponto de controle.

Após foi aplicado o teste de homogeneidade (Levene) para os dados do ponto de controle (MP e mutações) e obteve-se p-valor= $3,45 \cdot 10^{-05}$. Com estes resultados, verifica-se que a hipótese de normalidade e homogeneidade foram rejeitadas então aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis, que apresentou o p-valor= $1,102 \cdot 10^{-06}$.

Como o teste de KW retornou o valor de p-valor $<0,05$, então aplicou-se o teste de *post-hoc* para verificar qual grupo difere-se entre si, com o p-valor apresentado na tabela 5.

Tabela 5 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW – Controle.

Controle	MP ₁₀ C	MP _{2,5} C
MP_{2,5}C	0,9	-
TradC	$5,30 \cdot 10^{-05}$	$6,80 \cdot 10^{-06}$

Com o resultado descrito na tabela 5, observa-se que o grupo TradC-MP₁₀C e TradC-MP_{2,5}C, demonstraram p-valor $<0,05$. O teste ainda apresentou evidências de não haver diferença significativa entre MP₁₀C-MP_{2,5}C, o que pode ser observado na figura 27, onde os dados são muito próximos, até mesmo iguais e também com os dados do valor da mediana (0,12) e média (0,13) ficaram próximos e o valor do desvio padrão ($\pm 0,04$) foi baixo, indicando que os dados estão próximos da média.

Os resultados do teste de correlação de Spearman (r) para as mutações e dados de MP do ponto de controle estão demonstrados na tabela 6.

Tabela 6 – Correlação de Spearman para os dados do ponto de controle.

Controle	TradC x MP ₁₀ C	TradC x MP _{2,5} C
Correlação. Spearman (r)	0,1980	0,2284

A tabela 6 traz os valores de r dos testes estatísticos mencionados e a correlação de Spearman apresentou uma relação positiva, sendo os valores de r uma correlação fraca.

4.2 TRAD-SHM PARA TODOS OS PONTOS DE MONITORAMENTO

A coleta de flores da *Tradescantia* sp. clone 4430 para os demais pontos de monitoramento ocorreram em momentos, quantidades e frequência diferentes. A metodologia foi comentada na seção 3.5.

Na análise de laboratório, todas as células rosas foram computadas e algumas foram fotografadas.

Na figura 29 estão alguns exemplos de aberrações em pelo estaminal da *Tradescantia* sp. clone 4430, que foram observados durante as análises em microscópio.

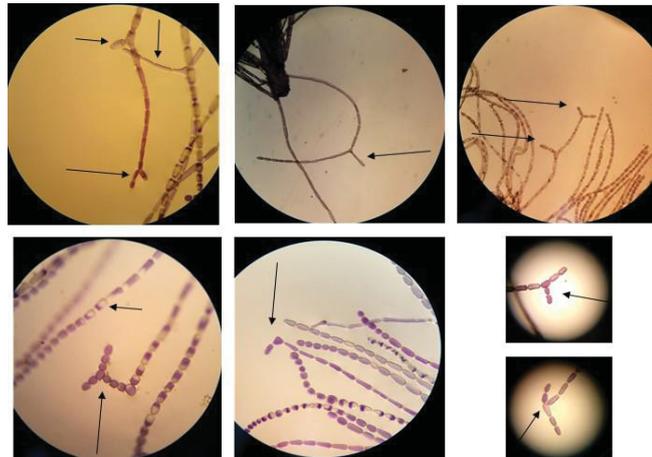


Figura 29 – Aberrações encontradas durante a análise do bioensaio Trad-SHM (indicadas com a seta).

Na figura 30 estão alguns exemplos de mutação rosa em pelo estaminal da *Tradescantia* sp. clone 4430 encontradas durante as análises do bioensaio Trad-SHM, onde percebe-se que nem sempre todas as células do pelo estaminal apresentam a coloração rosa.

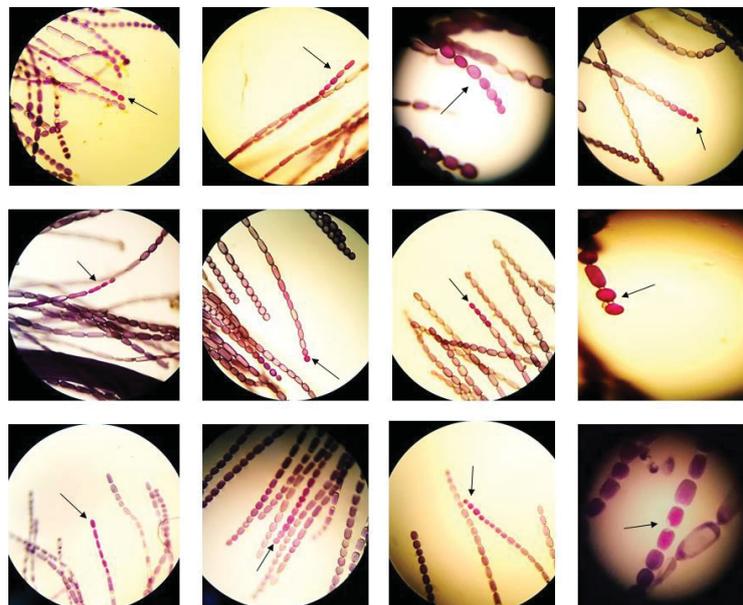


Figura 30 – Mutações em pelo estaminal observadas pelo bioensaio Trad-SHM (indicadas pelas setas).

Neste trabalho foram detectados todos os tipos de aberração descritas na figura 24, sendo a mais comum, células incolores e pelo estaminal ramificado (figura 29). Porém, estas alterações não foram contabilizadas no número de eventos de mutação em pelo estaminal, somente as células rosas (figura 30), tendo em vista que estas outras alterações não possuem uma definição bem certa do porquê ocorrem (Underbrink, Schairer e Sparrow, 1973).

Na tabela 7 estão os resultados encontrados da mediana, das médias e o desvio padrão das frequências de mutação em pelo estaminal encontradas. Na figura 31 está representado o *boxplot* das frequências de mutação em pelo estaminal dos pontos amostrais, incluindo o ponto de controle e também uma média de todos os pontos amostrais (exceto controle), denominado como “Curitiba”.

Tabela 7 – Mediana, média e desvio padrão para a frequência de mutação em pelo estaminal (número de mutações por 1000 pelos estaminais).

Estação	Mediana	Média ± desvio padrão
CURITIBA	31,74	62,67 ± 76,16
CONTROLE	0,55	0,49 ± 0,20
BATEL	3,47	15,96 ± 21,67
MERCES	10,17	66,74 ± 98,03
BOTANICO	20,49	52,53 ± 71,29
JDAMERICAS	55,50	84,68 ± 83,86
BVISTA	18,94	41,81 ± 53,94
ORLEANS	17,98	18,35 ± 11,02
GUAIRA	49,09	69,69 ± 74,30
ARAUCARIA	34,97	52,27 ± 48,85

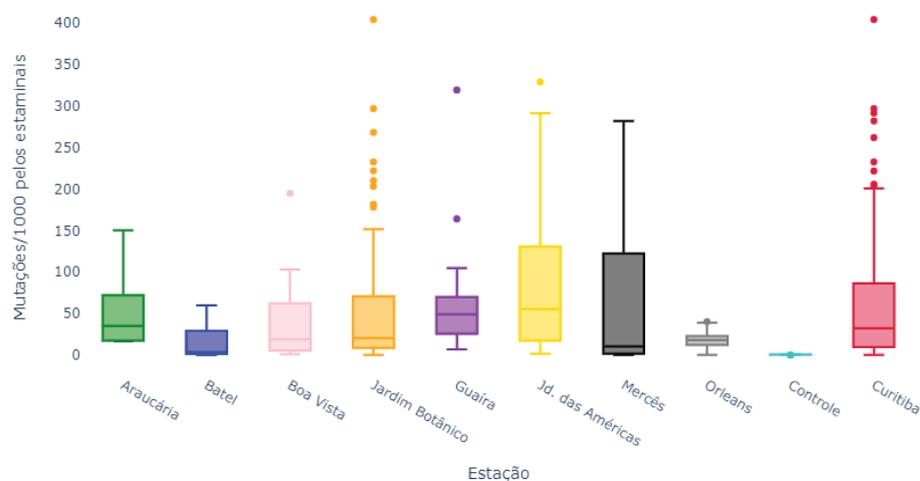


Figura 31 – *Boxplot* da frequência de mutação em pelo estaminal.

A figura 31 mostra a frequência de mutações em pelo estaminal para todos os pontos estudados e verificou-se comportamentos diferentes entre os mesmos, devido a frequência e

quantidade de flores coletadas não terem sido semelhantes, além deste gráfico mostrar os valores *outliers* que apareceram durante a análise. Diferente do ponto de controle, as medianas dos demais pontos ficaram mais próximas do primeiro quartil, apresentando assim, uma assimetria positiva, já que as médias, como mostrado na tabela 7 ficaram todas acima da mediana, ficando assim os valores mais concentrados na parte inferior do *boxplot*. Com relação a dispersão dos dados, o ponto do Mercês e Jd. das Américas, foram os pontos que apresentaram maior dispersão em relação aos demais, devido a diferença entre o terceiro e o primeiro quartil ser maior nestes dois pontos, já no ponto do Orleans, foi onde ocorreu a menor variação dos dados.

Aplicado os testes estatísticos de normalidade e homogeneidade para os dados dos pontos de monitoramento, e os resultados do p-valor estão descritos na tabela 8 e 9. Com o p-valor < 0,05, procedeu-se com o teste de Kruskal-Wallis, que está demonstrado na tabela 10. Com isso, foi executado o teste de *post-hoc* de Nemenyi e o resultado pode ser observado na tabela 11, com combinação dois a dois.

Tabela 8 – Resultados do p-valor para a estatística de SW – todos os pontos.

Ponto	p-valor
Batel	6,64 10 ⁻⁰⁴
Mercês	1,02 10 ⁻⁰⁴
Jd. Botânico	1,04 10 ⁻⁰⁴
Jd. Américas	4,72 10 ⁻⁰²
Boa Vista	1,33 10 ⁻⁰³
Orleans	3,34 10 ⁻⁰²
Guaira	5,46 10 ⁻⁰⁵
Araucária	3,30 10 ⁻⁰²

Observa-se que todos os valores da tabela 8 ficaram abaixo dos 5%, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal. Aqui foram usados somente os valores das frequências de mutações de cada ponto.

Tabela 9 – Resultados do p-valor para as estatísticas, englobando todos os resultados da frequência de mutação em pelo estaminal.

Geral	p-valor
Shapiro-Wilk	3,25 10 ⁻¹⁵
Levene	1,64 10 ⁻⁰⁵
Kruskal-Wallis	2,20 10 ⁻¹⁶

Para o teste de Levene foi considerado todos os valores das mutações de todos os pontos, inclusive o ponto de controle e apresentou heterogeneidade para os dados. Adotando o mesmo conceito de aplicar a estatística para todos os dados, o teste de Shapiro-Wilk continuou com a não normalidade e o Kruskal-Wallis também apresentou um valor abaixo do 5% de significância. Na tabela 10 é mostrado o teste de KW separadamente, por ponto junto com os dados do controle.

Tabela 10 – Resultados do p-valor para a estatística de KW – Trad-SHM.

Ponto	p-valor
Batel	2,43 10 ⁻⁰⁵
Mercês	1,61 10 ⁻⁰⁶
Jd. Botânico	9,38 10 ⁻¹²
Jd. Américas	5,67 10 ⁻¹¹
Boa Vista	7,16 10 ⁻⁰⁷
Orleans	9,85 10 ⁻⁰⁷
Guaira	2,55 10 ⁻⁰⁷
Araucária	9,18 10 ⁻⁰⁵

Os valores para as frequências de mutação por ponto junto com o controle, tiveram resultado de p-valor<0,05 (tabela 10), com isso aplicou-se o teste de Nemenyi (tabela 11), para verificar quais pontos diferem entre si.

Tabela 11 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW – Trad-SHM.

	Controle	Batel	Mercês	Jd. Botânico	Jd. Américas	Boa Vista	Orleans	Guaira
Batel	4,10 10 ⁻⁰¹	-	-	-	-	-	-	-
Mercês	2,14 10 ⁻⁰³	0,86724	-	-	-	-	-	-
Jd. Botânico	2,00 10 ⁻¹³	0,00036	0,99034	-	-	-	-	-
Jd. Américas	2,10 10 ⁻¹³	0,00013	0,03110	0,99966	-	-	-	-
Boa Vista	6,76 10 ⁻⁰³	0,90795	1,00000	0,14057	0,06355	-	-	-
Orleans	6,33 10 ⁻⁰²	0,99974	0,98687	0,00091	0,00034	0,99721	-	-
Guaira	1,10 10 ⁻⁰⁶	0,08592	0,83044	0,97894	0,87034	0,86860	0,20908	-
Araucária	8,55 10 ⁻⁰³	0,68803	0,07559	0,93378	0,81092	0,99913	0,88927	0,99991

Na tabela 11, observa-se que a exceção do ponto Batel e Orleans, todos os demais diferem do ponto de controle em relação as mutações. Realizando a comparação entre os pontos, o teste apresentou evidências de não haver diferença significativa entre estes pares, a exceção de Jd. Botânico x Batel, Jd. das Américas x Batel, Jd. das Américas x Mercês, Jd. Botânico x Orleans e Jd. das Américas x Orleans, onde todos estes apresentaram p-valor<0,05.

No trabalho de André (2007) foi realizado teste de mutação em pelo estaminal em plantas *Tradescantia* sp. clone 4430 que ficaram expostas no ambiente e de flores que ficaram dentro de uma câmara de topo aberto, onde o ar era filtrado e obteve-se o resultado de haver mais mutações nos pelos estaminais das flores que estavam expostas ao ar sem filtração. Nesta pesquisa, mesmo usando um sistema mais simples de filtração, obteve-se também uma redução da frequência de mutação em pelo estaminal do ponto de controle para os demais, o que também pode ser observado na tabela 11 nas comparações por pares e também na figura 31. No trabalho de Lau (2002) também foi observado diferença entre o ponto de controle e demais pontos estudados, indicando assim que os pontos de monitoramento possuíam um potencial genotóxico do ar.

Na tese de doutorado de Oliveira (2010), a autora usou o bioensaio Trad-SHM para avaliar o risco mutagênico dos poluentes provenientes da queima de diversos combustíveis usados nos veículos. A análise foi feita em laboratório dentro de uma câmara de fumigação, sendo que os gases foram misturados com o ar ambiente para simular a realidade do trânsito urbano. As flores foram expostas aos gases poluentes emitidos aos combustíveis álcool, biodiesel, gasolina e diesel e os resultados obtidos demonstraram que as frequências de mutação foram maiores quando expostas aos gases provenientes da combustão da gasolina e diesel, por serem combustíveis de origem fóssil. Trabalho semelhante foi feito por Placencia *et al.* (2019) que também fez análise em laboratório usando uma câmara de exposição para a aplicação dos gases e fez uma comparação com o biodiesel de gordura animal, de óleo de palma e óleo de soja para avaliar seus impactos genotóxicos na planta e os resultados demonstraram que as mutações foram bem menores quando expostas ao óleo de palma em comparação com os outros dois. Ambos os trabalhos destacam a presença do hidrocarboneto policíclico aromático (HPA) nestas emissões dos combustíveis e por se tratar de uma substância carcinogênica e mutagênica.

O bioensaio Trad-SHM é um teste de mutagênese que fornece respostas importantes sobre os efeitos que diferentes formas de poluição podem causar na planta bioindicadora, mesmo que em baixos níveis. A sensibilidade deste bioensaio é muito utilizada para detectar poluentes oriundos de resíduos de mineração, queima de resíduos, atividades industriais, queima incompleta de combustíveis fósseis, utilização de fungicidas e pesticidas na agricultura, produtos químicos presentes na água, contaminação do solo, entre tantos outros. E esta sensibilidade aliada a sua praticidade metodológica, fácil manuseio e interpretação dos dados, torna este bioensaio um importante aliado na avaliação dos impactos que os poluentes ambientais podem trazer para o ecossistema em geral.

Embora ainda os efeitos observados nos bioindicadores não possam ser extrapolados diretamente para o ser humano, não se pode deixar de considerar a importância dos resultados destes bioensaios para entender os potenciais riscos aos quais todos dos seres vivos estão expostos. Como normalmente as plantas são mais sensíveis que os animais incluindo o ser humano, então mesmo que as concentrações dos poluentes estejam baixo, as plantas responderão de alguma maneira a este estresse (ALVES *et al.*, 2001).

Portanto, a escolha de bioensaios como um verificador do potencial mutagênico dos poluentes presentes no ar ou na água ou no solo, não se deve apenas a sua versatilidade, rápida resposta, fácil manuseio e manutenção, fácil compreensão dos resultados e outras propriedades, mas também a sensibilidade que os bioindicadores apresentam quando expostos a um ambiente com a presença de qualquer agente poluidor.

4.3 CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO

De acordo com um levantamento realizado pelo Instituto Saúde e Sustentabilidade (2019) das 27 unidades federativas do Brasil, 20 não realizam ou deixaram de realizar ou fazem de maneira obsoleta e ineficaz o monitoramento da qualidade do ar, pois o custo para a implantação de um sistema de monitoramento eficaz é alto e muitos municípios não dispõem de tamanha quantidade de recursos para fazer a aquisição de um bom equipamento. Sabe-se da importância em ter um monitoramento da qualidade do ar em todos os municípios e principalmente, as informações estarem acessíveis aos munícipes, por isso deve-se buscar alternativas mais econômicas para este fim e os sensores de baixo custo são uma opção.

O monitoramento de MP usando sensores de baixo custo vem crescendo nos últimos anos a nível global, em implantações de redes de monitoramento a projetos de ciências seja em escolas ou universidades, principalmente na área urbana, com o intuito de monitorar os poluentes presentes no ar. E os sensores que usam a tecnologia de espalhamento a laser, como é o caso do SDS011, são os mais empregados nas pesquisas, devido a sua melhor estabilidade e leituras mais precisas (BUDDE *et al.*, 2018).

As concentrações de material particulado foram coletadas pelo sensor SDS011 no período de janeiro de 2020 a fevereiro de 2021. Os dados foram tratados e calculadas as médias diárias para cada MP de cada estação e os resultados podem ser observados nas figuras 32 e 33. Em alguns períodos houve falha durante as medições, por problemas de falta de energia ou manutenção do equipamento.

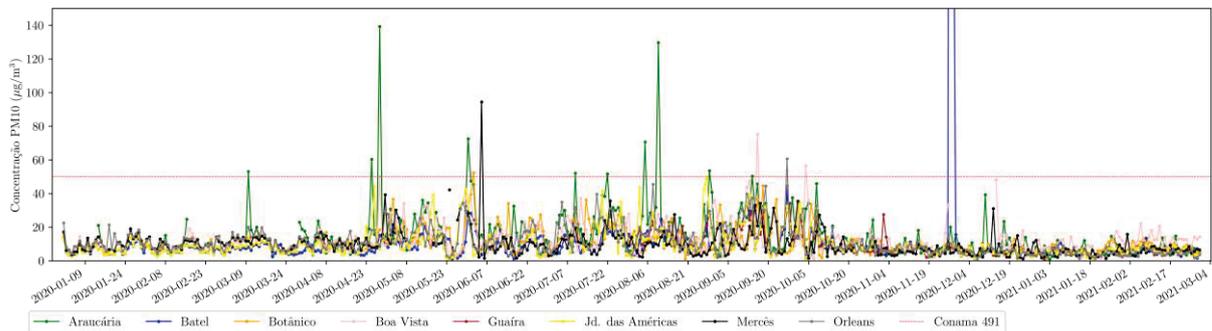


Figura 32 – Concentrações médias diárias de MP₁₀.

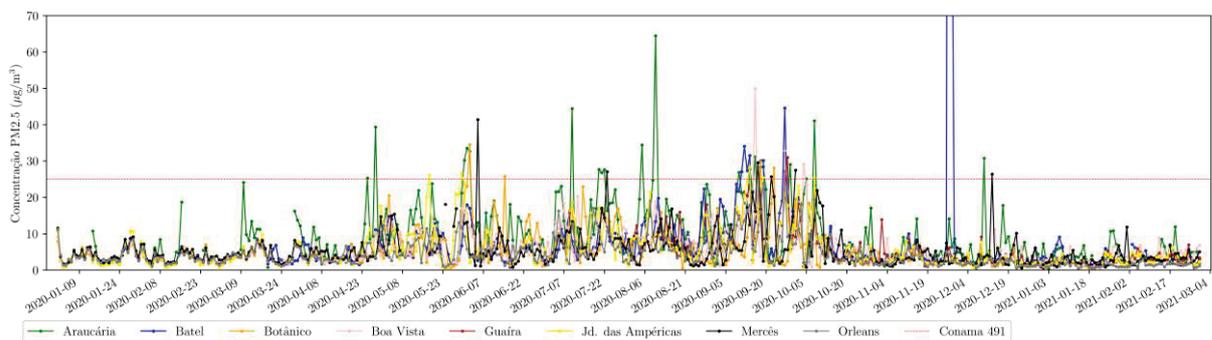


Figura 33 – Concentrações médias diárias de MP_{2.5}.

As linhas horizontais tracejadas em vermelho nas figuras 32 e 33 referem-se a limite imposto pela Resolução CONAMA 491/2018, onde os limites diários de MP₁₀ e MP_{2.5} não devem ultrapassar as concentrações de 50 e 25µg/m³ respectivamente, para que sejam atendidos os padrões de qualidade do ar estabelecido por esta Resolução. Durante o período da coleta dos dados, 19 dias ultrapassaram o limite para MP₁₀ e 38 dias ultrapassaram o limite para MP_{2.5}, não sendo necessariamente os mesmos dias. A estação que mais vezes passou os limites no MP₁₀ foi a de Araucária (10 dias para MP₁₀ e 20 dias para MP_{2.5}), devido a sua localização próxima as indústrias do município e também por haver vias de maior tráfego de veículos nesta região, fato este observado por Castelhana (2019) que notou um padrão da concentração de MP ser mais alta na região de Araucária ser oriunda dos locais onde ficam as vias de grande fluxo de veículos; e para o MP_{2.5}, além de Araucária, a estação Batel apresentou mais dias com a concentração diária acima do limite estabelecido. A estação Batel apresentou um evento atípico no final do mês de novembro de 2020 (dias 27 e 28), com uma concentração bem elevada para ambos MP, que pode ser considerado como um evento pontual, como uma queimada próxima ou uma fonte fixa próxima que liberou poluentes por um longo período.

Conforme a tabela 3, apresentada na seção 2.3, o IQAr é na maior parte do ano considerado bom tanto para MP₁₀ quanto para MP_{2.5} em todos os pontos e nos dias que os limites foram ultrapassados, o IQAr ficou entre moderado e ruim, sendo ruim para 2 dias em relação ao MP_{2.5} e de 3 dias em relação ao MP₁₀. E para a estação Batel que apresentou um valor muito alto de concentração, pode-se considerar o IQAr deste dia como muito ruim para esta estação.

Nota-se ainda nas figuras 32 e 33, que houve um aumento da concentração de MP entre os meses de abril a outubro, o que correspondente às estações do ano entre outono e primavera. São meses que normalmente são mais secos e quando ocorre o fenômeno da inversão térmica, o que contribui para o aumento da concentração principalmente no período da manhã. No estudo de Castelhana (2019), usando dados de medição de MP das estações de monitoramento do IAP (Instituto Ambiental do Paraná – hoje IAT), em Curitiba no ano de 2015, observou-se também um aumento na concentração de MP entre os meses de abril e setembro, tendo seu pico nos meses de julho e agosto, no qual o autor relacionou este aumento na concentração devido à baixa precipitação naquele período do ano. Neste período também ocorre muitas queimadas em vegetação seca, e dependendo das condições climáticas para a região, pode contribuir para o aumento de particulados na atmosfera, devido a dispersão causada pela ação dos ventos. De acordo com o Sistema Digital de Dados Operacionais do Corpo de Bombeiros do Paraná (SYSBM-CCB), os registros de incêndio em Curitiba e Região Metropolitana, totalizaram 4.971 casos entre 1º de janeiro de 2020 a 19 de abril de 2021, sendo 50,4% do total destes registros foram em incêndios na vegetação. No Paraná, em média, 40,5% dos registros de incêndio de um ano inteiro aconteceram entre os meses de julho, agosto e setembro (KOWALSKI, 2021).

No trabalho de Sarra e Mülfarth (2021), as autoras analisaram os impactos das queimadas da região Centro-Oeste do Brasil em algumas cidades do estado de São Paulo, onde no mês de setembro/2020 houve um aumento significativo dos focos de queimadas na região Centro-Oeste em comparação aos anos anteriores, e quando relacionado a concentração de MP₁₀ e MP_{2.5} medido neste mesmo período, identificou um aumento de mais de 50% das concentrações em relação aos anos anteriores e que poderia estar relacionado as queimadas da região Centro-Oeste, onde os poluentes foram transportados através dos ventos. Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de Moreira *et al.* (2014), quando os autores analisaram a concentração de material particulado entre os anos de 2008 e 2009 e as maiores concentrações ocorreram entre os meses de agosto a outubro, que foi um período condizente com as queimadas ocorridas na Amazônia, com uma correlação de 0,96.

Todos os pontos de monitoramento deste trabalho estão localizados próximos a vias de grande circulação de veículos, sejam avenidas ou rodovia (BR) e a maioria são áreas centrais ou próximas ao centro, o que também contribui para o grande fluxo de veículos, além de estarem próximos a estabelecimentos comerciais e restaurantes, que possam ter chaminés que são usadas com frequência.

Aplicado os testes estatísticos de normalidade e homogeneidade para os dados dos pontos de monitoramento, os resultados do p-valor estão descritos nas tabelas 12 e 13. Com o p-valor < 0,05, usou-se o teste de Kruskal-Wallis, que está demonstrado na tabela 14. Com isso, foi executado o teste de *post-hoc* de Nemenyi e o resultado pode ser observado nas tabelas 15 e 16, com combinação dois a dois.

Tabela 12 – Resultados do p-valor para a estatística de SW e Levene para MP₁₀ e MP_{2.5}.

Batel	MP₁₀	MP_{2.5}
Shapiro-Wilk	7,07 10 ⁻⁰⁶	3,81 10 ⁻⁰⁵
Levene	1,15 10 ⁻⁰⁸	
Mercês	MP₁₀	MP_{2.5}
Shapiro-Wilk	1,62 10 ⁻⁰²	7,33 10 ⁻⁰³
Levene	4,58 10 ⁻⁰⁹	
Jd. Botânico	MP₁₀	MP_{2.5}
Shapiro-Wilk	1,88 10 ⁻⁰⁹	3,02 10 ⁻¹¹
Levene	5,01 10 ⁻⁰⁹	
Jd. das Americas	MP₁₀	MP_{2.5}
Shapiro-Wilk	9,65 10 ⁻⁰⁷	3,08 10 ⁻⁰⁷
Levene	9,85 10 ⁻⁰⁶	
Boa Vista	MP₁₀	MP_{2.5}
Shapiro-Wilk	3,20 10 ⁻⁰²	1,65 10 ⁻⁰²
Levene	1,15 10 ⁻⁰⁸	
Orleans	MP₁₀	MP_{2.5}
Shapiro-Wilk	1,59 10 ⁻⁰⁴	1,76 10 ⁻⁰⁴
Levene	1,26 10 ⁻⁰⁴	
Guaíra	MP₁₀	MP_{2.5}
Shapiro-Wilk	4,26 10 ⁻⁰²	2,10 10 ⁻⁰³
Levene	5,88 10 ⁻⁰⁸	
Araucária	MP₁₀	MP_{2.5}
Shapiro-Wilk	1,47 10 ⁻⁰²	4,07 10 ⁻⁰²
Levene	2,00 10 ⁻⁰⁹	

Observa-se que todos os valores da tabela 12 ficaram abaixo dos 5%, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal e não são homogêneos. Aqui foram usados somente os valores das concentrações de MP de cada ponto.

Tabela 13 – Resultados do p-valor para as estatísticas, englobando todos os resultados das concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5}.

Geral	p-valor
Shapiro-Wilk	2,20 10 ⁻¹⁶
Levene	2,07 10 ⁻⁰⁷
Kruskal-Wallis	2,20 10 ⁻¹⁶

Na tabela 13 o teste de Levene foi realizado considerando todos os valores das concentrações de MP de todos os pontos, inclusive o ponto de controle e apresentou heterogeneidade para os dados. Adotando o mesmo conceito de aplicar a estatística para todos os dados, o teste de Shapiro-Wilk continuou com a não normalidade e o Kruskal-Wallis também apresentou um valor abaixo do 5% de significância. Na tabela 14 é mostrado o teste de KW, onde foram usadas as concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5} de cada ponto junto com o MP₁₀ e MP_{2.5} do controle para compor o teste.

Tabela 14 – Resultados do p-valor para a estatística de KW – MP₁₀ e MP_{2.5}.

Ponto	p-valor
Batel	5,93 10 ⁻¹¹
Mercês	7,11 10 ⁻¹³
Jd. Botânico	2,20 10 ⁻¹⁶
Jd. Américas	2,20 10 ⁻¹⁶
Boa Vista	2,11 10 ⁻¹¹
Orleans	1,55 10 ⁻¹³
Guaira	1,21 10 ⁻¹²
Araucária	6,41 10 ⁻⁰⁷

Na tabela 14 as concentrações de MP tiveram resultado de p-valor<0,05, com isso aplicou-se o teste de Nemenyi (tabela 15 e 16), para verificar quais pontos diferem entre si.

Tabela 15 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para MP₁₀.

	Controle	Batel	Mercês	Jd. Botânico	Jd. Américas	Boa Vista	Orleans	Guáira
Batel	1,10 10 ⁻⁰⁷	-	-	-	-	-	-	-
Mercês	2,80 10 ⁻⁰⁹	1,00000	-	-	-	-	-	-
Jd. Botânico	2,00 10 ⁻¹³	0,99997	0,99997	-	-	-	-	-
Jd. Américas	1,00 10 ⁻¹²	1,00000	1,00000	0,86540	-	-	-	-
Boa Vista	2,50 10 ⁻¹³	0,92619	0,91883	0,99008	0,48033	-	-	-
Orleans	3,30 10 ⁻⁰⁷	1,00000	1,00000	0,85686	1,00000	0,41549	-	-
Guáira	4,00 10 ⁻⁰⁸	1,00000	1,00000	0,99831	1,00000	0,80070	1,00000	-
Araucária	1,00 10 ⁻⁰⁸	1,00000	0,98716	0,99964	0,88235	1,00000	0,78420	0,95665

Tabela 16 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para MP_{2.5}.

	Controle	Batel	Mercês	Jd. Botânico	Jd. Américas	Boa Vista	Orleans	Guáira
Batel	6,70 10 ⁻⁰⁵	-	-	-	-	-	-	-
Mercês	9,10 10 ⁻⁰⁴	1,00000	-	-	-	-	-	-
Jd. Botânico	1,10 10 ⁻⁰³	0,62578	0,99034	-	-	-	-	-
Jd. Américas	2,46 10 ⁻⁰³	0,85934	0,99955	1,00000	-	-	-	-
Boa Vista	3,29 10 ⁻⁰³	1,00000	1,00000	0,99663	0,99983	-	-	-
Orleans	1,80 10 ⁻⁰⁵	0,23372	0,71627	0,99427	0,98804	0,80283	-	-
Guáira	9,36 10 ⁻⁰³	0,99899	1,00000	0,99999	1,00000	1,00000	0,95652	-
Araucária	3,40 10 ⁻⁰⁵	0,99974	0,93909	0,17203	0,31326	0,95972	0,04670	0,78415

Tanto na tabela 15 quanto na 16, nota-se que todos os pontos diferem do ponto de controle em relação a concentração de MP. Realizando a comparação entre os pontos, o teste apresentou evidências de não haver diferença significativa entre os pares, a exceção de Orleans x Araucária para MP_{2.5}, onde o resultado do p-valor < 0,05.

No trabalho de André (2007), foram realizadas medições de material particulado MP_{2.5} dentro de uma câmara de topo aberto, onde o ar passa por filtros e fora da câmara, e o resultado obtido foi uma redução de 75% de concentração de MP_{2.5} no sistema de filtragem da câmara de topo, durante o período do estudo. Nesta pesquisa, nota-se que houve diferença entre os pontos de monitoramento e o controle, o que demonstra que mesmo não usando um aparelho mais robusto com uso de filtros próprios para o experimento, obteve-se também um resultado de redução de MP do controle para os demais pontos.

Em Towakei (2018) os autores desenvolveram um projeto de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar em Bonne Terre, Vacoas, Ilhas Mauricio. Eles utilizaram o SDS011 e o *Raspberry Pi*, além de armazenar os dados na nuvem do Azure. Durante a coleta de dados, foi observado que em dois momentos as concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5} ultrapassaram os limites determinados pela OMS (50 e 25 µg/m³ respectivamente). Como início, o projeto se mostrou satisfatório, mas que precisa de ajustes para um melhor

desempenho, principalmente com relação a energia elétrica, que prejudicou alguns dias de coleta, por falta de energia.

No trabalho de Genikomsakis *et al.* (2018) os autores desenvolveram um sistema de baixo custo portátil de monitoramento da poluição do ar, usando um sensor SDS011 junto com um sistema de referência, em Mons na Bélgica. O sistema consiste em um laboratório móvel equipado com os instrumentos e realizando leituras a cada 1 min em beira de estrada. Os resultados se mostraram bons com leituras muito próximas, podendo o sensor SDS011 ser usado em outras medições, como foi feito neste artigo ainda, usando uma bicicleta com o sensor instalado nela para fazer a coleta de material particulado, sendo que os resultados também foram bons, com medições próximas ao valor indicado pelo equipamento de referência.

4.4 RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA DE MUTAÇÃO E A CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

A fim de se verificar se o material particulado presente no ar nos municípios de Curitiba e Araucária são capazes de provocar alterações no material genético em vegetais, exemplares de *Tradescantia* sp. clone 4430 foram submetidas a uma exposição crônica desde janeiro de 2020 até fevereiro de 2021, e os resultados da frequência de mutação em pelo estaminal foi comparada com a concentração de material particulado MP₁₀ e MP_{2,5}, coletados durante o mesmo período.

Como já descrito na seção 3.8, foi utilizada uma média de 18 dias para a concentração de material particulado anterior à data de coleta da *Tradescantia* sp. clone 4430, para poder realizar a comparação entre os resultados obtidos de cada amostrador e realizar as análises estatísticas. Gráficos foram gerados através de código desenvolvido na linguagem *Python*, para demonstrar a relação entre os resultados. Os gráficos estão representados nas figuras 34 a 42.

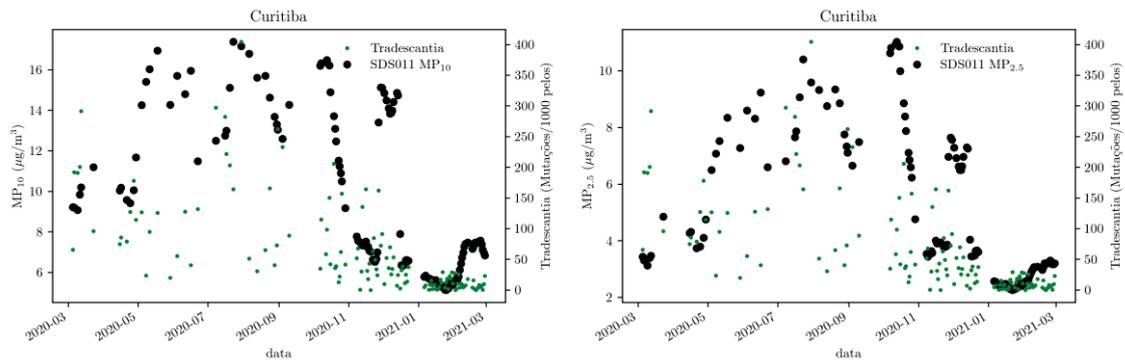


Figura 34 – Gráfico de MP_{10} e $MP_{2.5}$ x *Tradescantia* sp. clone 4430 para Curitiba.

A figura 34 representa a média feita entre todos os pontos de monitoramento para as concentrações de MP e as frequências de mutação em pelo estaminal.

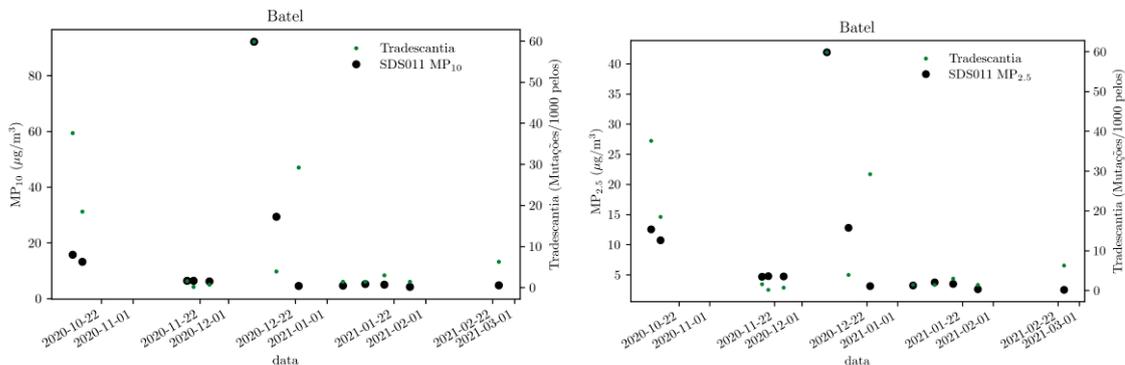


Figura 35 – Gráfico de MP_{10} e $MP_{2.5}$ x *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto Batel.

Na figura 35, referente a estação Batel, nota-se que teve um ponto que a concentração de MP_{10} e $MP_{2.5}$ ultrapassaram o limite diário definido pelo CONAMA 491/2018, com concentração de $92,16\mu\text{g}/\text{m}^3$ e $41,92\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Nota-se também que foi o dia com a maior frequência de mutação em pelo estaminal (59,87 mutações/1000). Analisando esta figura e as figuras 32 e 33, o ponto de maior concentração de MP_{10} e $MP_{2.5}$ e também de mutação, coincide com o mesmo período de média de MP do ponto de maior concentração, que foi o ponto atípico no final de novembro/2020, através da figura 35, verifica-se que o clone 4430 reagiu a este evento extremo através das mutações em pelo estaminal em maior quantidade comparado com as demais coletas.

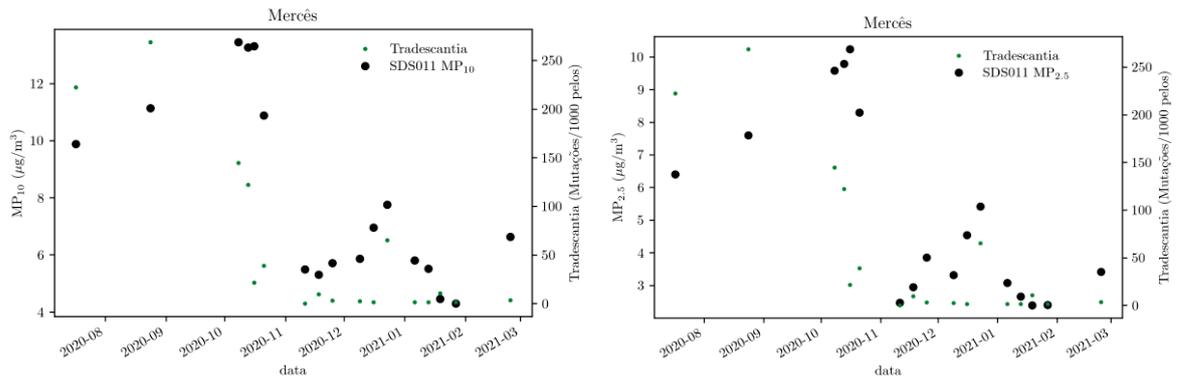


Figura 36 – Gráfico de MP_{10} e $MP_{2.5}$ x *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto Mercês.

Na figura 36 nota-se que as concentrações de MP_{10} e $MP_{2.5}$ e as mutações ficaram mais elevadas entre agosto e final de novembro, período que corresponde as maiores concentrações de MP_{10} e $MP_{2.5}$ do ano de 2020, conforme visto nas figuras 32 e 33. As concentrações de MP_{10} e $MP_{2.5}$ ficaram dentro dos limites do CONAMA 491/2018.

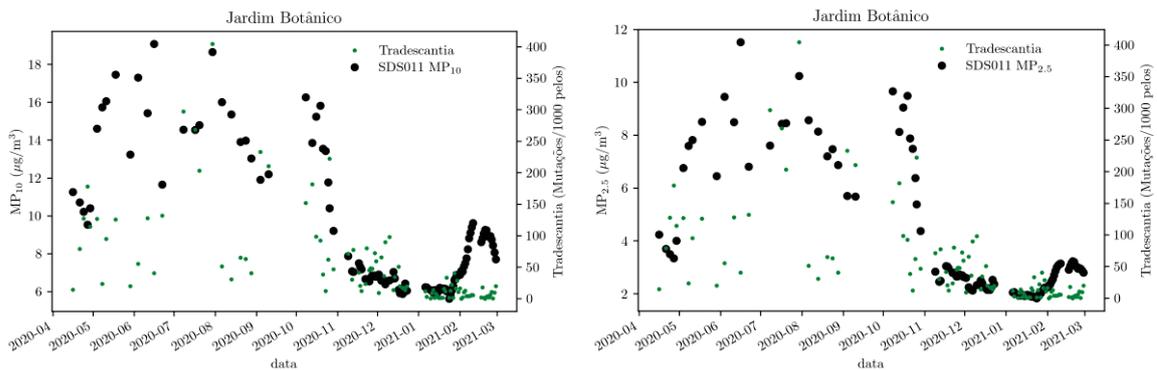


Figura 37 – Gráfico de MP_{10} e $MP_{2.5}$ x *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto Jd. Botânico.

Na figura 37, as concentrações de MP_{10} e $MP_{2.5}$ ficaram dentro do limite diário do CONAMA 491/2018 e assim como na figura anterior, as maiores concentrações de MP_{10} e $MP_{2.5}$ ficaram entre abril e novembro e as frequências de mutação acompanharam esta elevação na concentração, sendo que após dezembro, quando os dados de MP diminuem, as mutações também decrescem e apresentam uma certa constância em seus dados.

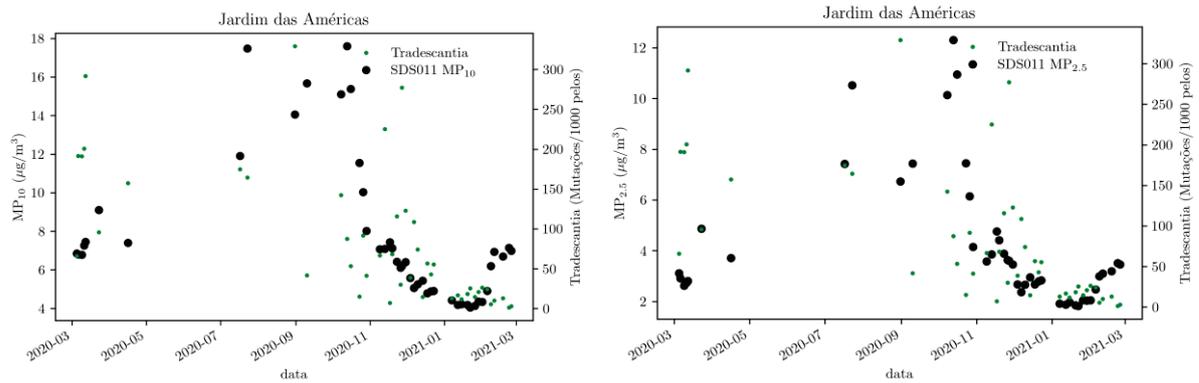


Figura 38 – Gráfico de MP₁₀ e MP_{2.5} x *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto Jd. das Américas.

Na figura 38, as concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5} ficaram dentro do limite diário do CONAMA 491/2018 e assim como na figura anterior, as maiores concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5} ficaram entre abril e novembro e as frequências de mutação acompanharam esta elevação na concentração, sendo que após dezembro, quando os dados de MP diminuem, as mutações também decrescem e seguem em uma certa constância em seus dados.

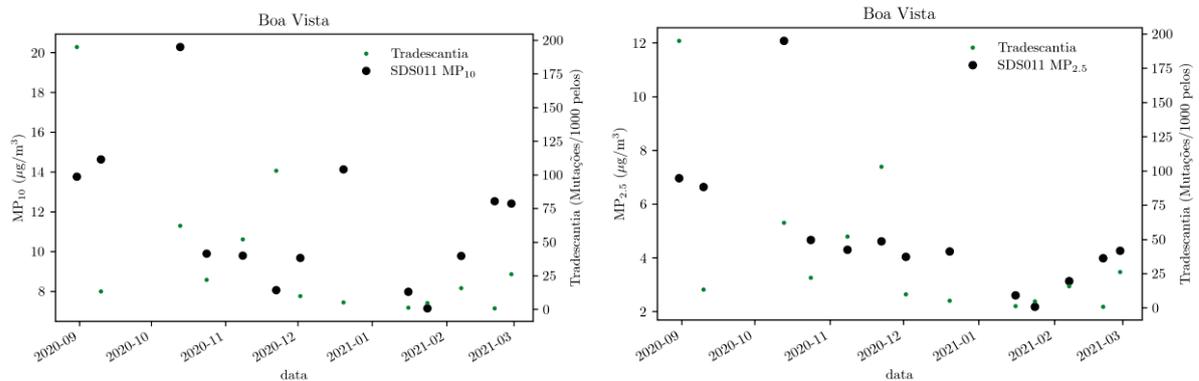


Figura 39 – Gráfico de MP₁₀ e MP_{2.5} x *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto Boa Vista.

Na figura 39, as concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5} ficaram dentro do limite diário do CONAMA 491/2018 e os dados de mutação de setembro até dezembro de 2020 ficaram mais dispersos, sendo que depois ficam mais constantes com valores muito parecidos entre as análises.

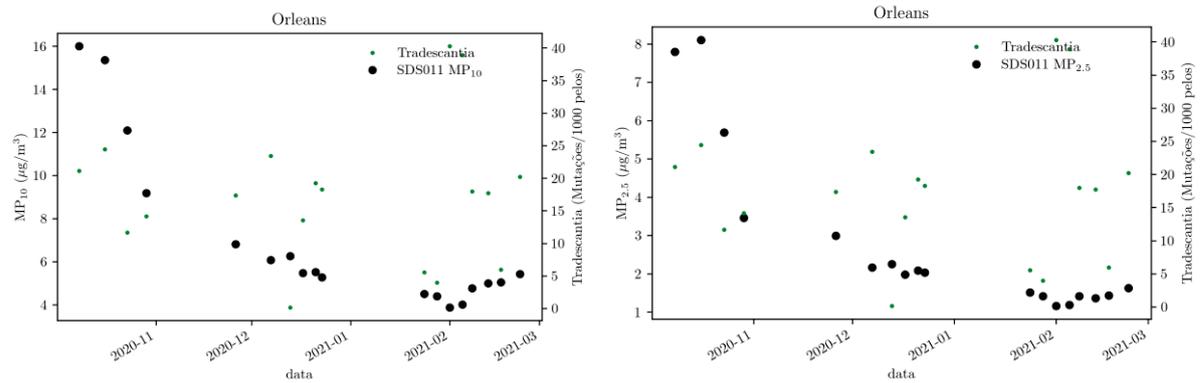


Figura 40 – Gráfico de MP₁₀ e MP_{2.5} x *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto Orleans.

Na figura 40, as concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5} ficaram dentro do limite diário do CONAMA 491/2018 e percebe-se que as concentrações de MP foram reduzindo desde final de outubro até final de março, sendo o mês de novembro com as maiores variações de concentração de MP₁₀ e MP_{2.5}, já as mutações se mantiveram com valores muito próximos em praticamente todas as análises.

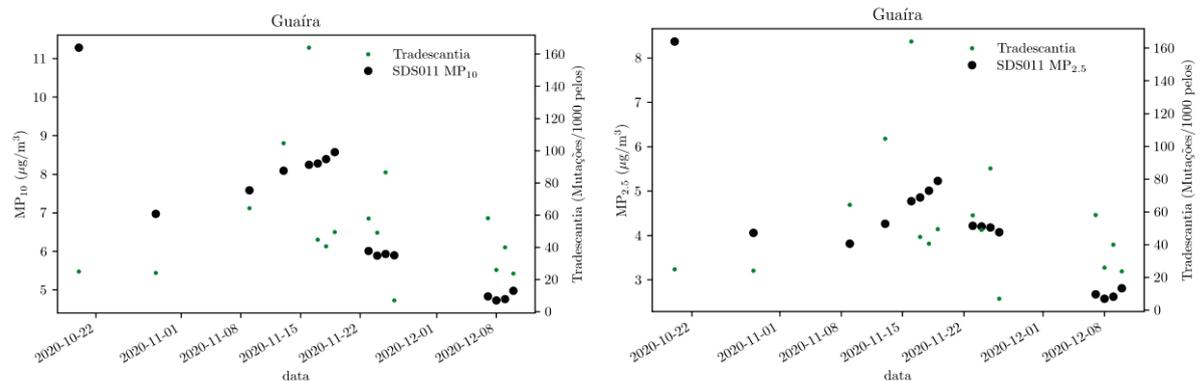


Figura 41 – Gráfico de MP₁₀ e MP_{2.5} x *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto Guaíra.

Na figura 41, as concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5} ficaram dentro do limite diário do CONAMA 491/2018 e tanto os dados de mutação quanto de MP apresentaram alguns nichos, como entre o dia 15/11 até 22/11 onde as concentrações tiveram valores semelhantes, assim como de 22/11 até o final de novembro e depois no começo de dezembro. Já as mutações tiveram um comportamento semelhante entre 15/11 e final de novembro e depois no começo de dezembro.

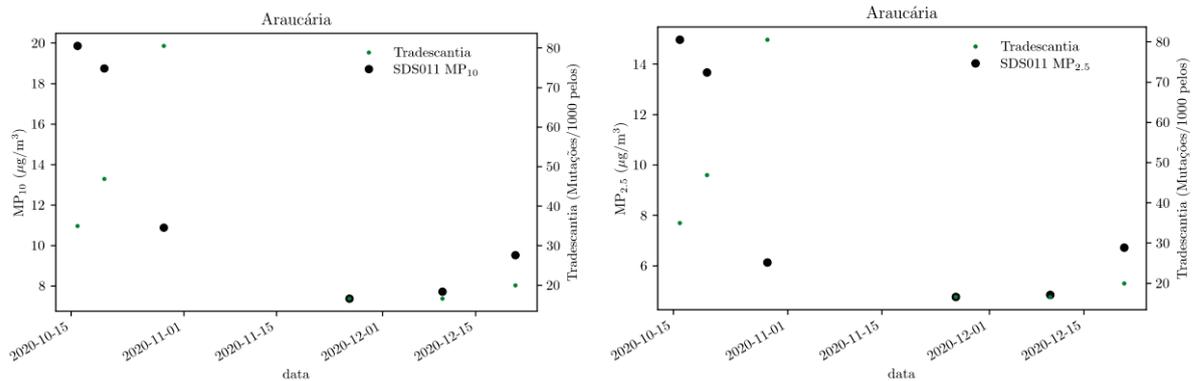


Figura 42 – Gráfico de MP₁₀ e MP_{2.5} x *Tradescantia* sp. clone 4430 para o ponto Araucária.

Na figura 42, as concentrações de MP₁₀ e MP_{2.5} ficaram dentro do limite diário do CONAMA 491/2018 e os dados de outubro até novembro de 2020 foram os que apresentaram maiores valores de concentração MP e as mutações em pelo estaminal também tiveram maior frequência neste período. Sendo que os dados de final de novembro até final de dezembro se mostraram parecidos, com redução de concentração de MP e de mutação em pelo estaminal.

Observando as figuras 34 a 42, pode-se perceber uma certa relação entre concentração de MP e frequência de mutação em pelo estaminal, o que ficou bem evidente na figura 35. Como demonstrado nas figuras 34 a 42, mesmo as médias das concentrações diárias estarem cumprindo o estabelecido em legislação, houve a presença de mutação em pelo estaminal, indicando que a *Tradescantia* sp. clone 4430 com o bioensaio Trad-SHM é sensível a poluentes presentes do ar, mesmo que em baixas concentrações. Outro ponto a se observar é que a maior incidência de mutações em pelo estaminal em todos os pontos ocorreu entre os meses de abril a novembro, período este como observado nas figuras 32 e 33 foram os meses em que as concentrações de MP tiveram uma elevação em comparação aos demais meses do ano. Lembrando que a atmosfera urbana é uma mistura de vários poluentes e cada um pode reagir de maneira diferente com a planta, dependendo de sua concentração.

Por fim, vale ressaltar que a *Tradescantia* sp. clone 4430 mostrou sensibilidade ao ambiente em que foi exposta, como mostrado nas figuras 34 a 42, indicando ser uma opção de monitoramento de baixo custo para a qualidade do ar, complementando as redes convencionais de monitoramento ou os sensores óticos de baixo custo.

Aplicado os testes estatísticos de normalidade e homogeneidade para os dados de MP₁₀ e MP_{2.5} e mutações dos oito pontos, e os resultados do p-valor estão descritos na tabela 17. Com o p-valor < 0,05, usou-se o teste de Kruskal-Wallis, que está demonstrado na tabela

18. Com isso, foi executado o teste de *post-hoc* de Nemenyi e o resultado pode ser observado nas tabelas 19-26, com combinação dois a dois.

Tabela 17 – Resultados do p-valor para a estatística de SW e Levene – todos os pontos.

Batel	Trad x MP
Shapiro-Wilk	2,20 10 ⁻¹⁶
Levene	8,74 10 ⁻⁰⁴
Mercês	Trad x MP
Shapiro-Wilk	2,20 10 ⁻¹⁶
Levene	2,90 10 ⁻⁰⁷
Jd. Botânico	Trad x MP
Shapiro-Wilk	2,20 10 ⁻¹⁶
Levene	2,20 10 ⁻¹⁶
Jd. das Américas	Trad x MP
Shapiro-Wilk	2,20 10 ⁻¹⁶
Levene	2,20 10 ⁻¹⁶
Boa Vista	Trad x MP
Shapiro-Wilk	2,20 10 ⁻¹⁶
Levene	2,50 10 ⁻¹⁶
Orleans	Trad x MP
Shapiro-Wilk	6,54 10 ⁻¹⁶
Levene	3,79 10 ⁻¹²
Guaíra	Trad x MP
Shapiro-Wilk	2,20 10 ⁻¹⁶
Levene	1,08 10 ⁻⁰⁵
Araucária	Trad x MP
Shapiro-Wilk	2,20 10 ⁻¹⁶
Levene	9,45 10 ⁻⁰⁸

Tabela 18 – Resultados do p-valor para a estatística de KW – Trad-SHM x MP.

Batel	Trad x MP
	2,94 10 ⁻¹⁶
Mercês	Trad x MP
	2,20 10 ⁻¹⁶
Jd. Botânico	Trad x MP
	2,20 10 ⁻¹⁶
Jd. Américas	Trad x MP
	2,20 10 ⁻¹⁶
Boa Vista	Trad x MP
	2,20 10 ⁻¹⁶
Orleans	Trad x MP
	2,20 10 ⁻¹⁶
Guaíra	Trad x MP
	2,20 10 ⁻¹⁶
Araucária	Trad x MP
	2,87 10 ⁻¹²

Assim como aconteceu em análises anteriores, as concentrações de MP e as frequências de mutação também tiveram resultado de $p\text{-valor} < 0,05$, com isso aplicou-se o teste de Nemenyi para cada ponto de monitoramento (tabelas 19-26), para verificar em quais pontos houve diferença em comparação das mutações em pelo estaminal e as concentrações de material particulado.

Tabela 19 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para Batel.

Batel	MP ₁₀	MP _{2.5}
MP _{2.5}	0,0340	-
Trad	0,1600	0,9000

Tabela 20 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para Mercês.

Mercês	MP ₁₀	MP _{2.5}
MP _{2.5}	0,042	-
Trad	0,800	0,2640

Nas tabelas 19 e 20, os pares Trad x MP₁₀ e Trad x MP_{2.5} (Trad=frequência de mutação /1000 pelos estaminais) não apresentaram evidências de haver diferença significativa entre eles ($p\text{-valor} > 0,05$), ou seja, o teste não indica que exista uma relação entre a concentração de material particulado e as mutações em *Tradescantia* sp. clone 4430 para o Batel e Mercês, já o par MP_{2.5} x MP₁₀, revelou haver uma diferença significativa.

Tabela 21 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para Jardim Botânico.

Jd. Botânico	MP ₁₀	MP _{2.5}
MP _{2.5}	$3,56 \cdot 10^{-02}$	-
Trad	0,0026	$2,80 \cdot 10^{-14}$

Tabela 22 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para Jardim das Américas.

Jd. Américas	MP ₁₀	MP _{2.5}
MP _{2.5}	$9,00 \cdot 10^{-05}$	-
Trad	$7,10 \cdot 10^{-07}$	$1,60 \cdot 10^{-09}$

Nas tabelas 21 e 22, os pares Trad x MP₁₀ e Trad x MP_{2.5}, revelaram haver uma diferença significativa, ou seja, a flor respondeu a exposição de um ambiente com poluição e de que existe uma relação entre a concentração de material particulado e as mutações em *Tradescantia* sp. clone 4430 para Jd. Botânico e Jd. das Américas.

Tabela 23 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para Boa Vista.

Boa Vista	MP₁₀	MP_{2.5}
MP_{2.5}	0,005	-
Trad	0,9331	0,0014

Tabela 24 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para Orleans.

Orleans	MP₁₀	MP_{2.5}
MP_{2.5}	0,0086	-
Trad	0,0619	5,40 10 ⁻⁰⁷

Nas tabelas 23 e 24, o par Trad x MP_{2.5} apresentou evidências de haver diferença significativa entre eles (p-valor<0,05), ou seja, o teste indica que exista uma relação entre a concentração de material particulado MP_{2.5} e as mutações em *Tradescantia* sp. clone 4430 para o Boa Vista e Orleans, já o par Trad x MP₁₀, revelou não haver uma diferença significativa para MP₁₀.

Tabela 25 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para Guaiúra.

Guaiúra	MP₁₀	MP_{2.5}
MP_{2.5}	0,0356	-
Trad	0,0011	4,60 10 ⁻⁰⁹

Na tabela 25, os pares Trad x MP₁₀ e Trad x MP_{2.5}, revelaram haver uma diferença significativa, ou seja, a flor respondeu a exposição de um ambiente com poluição e de que existe uma relação entre a concentração de material particulado e as mutações em *Tradescantia* sp. clone 4430 para Guaiúra.

Tabela 26 – Resultado do teste *post-hoc* aplicado após KW para Araucária.

Araucária	MP₁₀	MP_{2.5}
MP_{2.5}	0,37560	-
Trad	0,08770	0,00160

Na tabela 26, nota-se que o par Trad x MP₁₀, não evidenciou diferença significativa entre os dados, já o par Trad x MP_{2.5} demonstra haver diferença significativa entre MP_{2.5} e as mutações em pelo estaminal.

No trabalho de Barbério e Lopes (2012), as autoras analisaram a frequência de mutação em pelo estaminal da *Tradescantia* KU-20 em duas localidades de Guaratinguetá-SP, caracterizadas por baixo e intenso fluxo veicular. As coletas ocorreram entre outubro/2011 a

junho/2012. Apesar dos resultados terem mostrado que houve mais mutações na localidade com maior fluxo de veículos, a análise estatística não mostrou diferença na frequência de mutação nos meses estudados entre as duas localidades. As autoras concluem, que apesar do resultado ter sido negativo, isso não significa que não haja poluentes no ar e ressaltam a continuidade do acompanhamento com o bioindicador.

Os resultados do teste de Spearman (r) para as mutações e dados de MP₁₀ e MP_{2.5} dos oito pontos de monitoramento estão demonstrados na tabela 27.

Tabela 27 – Correlação de Spearman para os dados de frequência de mutação e concentração de MP.

Batel		MP₁₀	MP_{2.5}
Cor. Spearman (r)	Trad-SHM	0,4444	0,3733
Mercês		MP₁₀	MP_{2.5}
Cor. Spearman (r)	Trad-SHM	0,7068	0,6744
Jd. Botânico		MP₁₀	MP_{2.5}
Cor. Spearman (r)	Trad-SHM	0,4811	0,5438
Jd. das Américas		MP₁₀	MP_{2.5}
Cor. Spearman (r)	Trad-SHM	0,4253	0,3737
Boa Vista		MP₁₀	MP_{2.5}
Cor. Spearman (r)	Trad-SHM	0,3362	0,7802
Orleans		MP₁₀	MP_{2.5}
Cor. Spearman (r)	Trad-SHM	0,0764	0,0457
Guaíra		MP₁₀	MP_{2.5}
Cor. Spearman (r)	Trad-SHM	0,3603	0,3521
Araucária		MP₁₀	MP_{2.5}
Cor. Spearman (r)	Trad-SHM	0,6666	0,5585

A tabela 27 traz os valores de r dos testes estatísticos mencionados e a correlação de Spearman apresentou uma relação positiva, sendo os valores de r variando entre correlação bem fraca até correlação forte.

Estudo realizado por Ferreira *et al.* (2003) no estado de São Paulo, tinha como objetivo avaliar a mutagênese da *Tradescantia* clone com o ensaio Trad-SHM em dois bairros do município de São Paulo, próximas ao centro e com grande fluxo de veículos. O resultado mostrou que as plantas que estavam expostas no bairro com o maior fluxo de veículos, apresentaram as maiores taxas de mutação. Ainda neste trabalho, os autores realizaram uma correlação linear entre a frequência de mutação e concentrações de CO, SO₂, NO₂ e MP, e os dados usados referem-se ao décimo dia anterior à data de amostragem da flor. Como resultado, somente a correlação entre as mutações e o MP mostrou-se positiva (r=0,41), o que

corroborar com os resultados de correlação desta pesquisa que também se mostraram positivos (tabela 27).

Outro estudo de Ferreira *et al.* (2000) verificaram o potencial mutagênico de emissões de um incinerador de resíduos sólidos de serviço de saúde em São Paulo, com o ensaio Trad-SHM. As plantas foram distribuídas em distâncias diferentes da fonte e as que estavam mais próximas da fonte apresentaram uma correlação positiva entre as mutações e as emissões do incinerador ($5,69 \pm 1,34$).

No trabalho de Guimarães *et al.* (2004) foi realizado o bioensaio Trad-SHM com o clone KU-2 para avaliar a toxicidade de MP_{10} em dois municípios de São Paulo (capital e interior) e a frequência de mutação observada nas flores do município do interior foram inferiores em relação a capital, onde média de MP_{10} da capital é de $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contra $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ do município do interior e a correlação entre o MP e as mutações se mostrou positiva ($r=0,47$).

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho avaliou os dados de concentração de material particulado em Curitiba e Araucária, distribuídos em oito pontos, bem como a frequência de mutação em pelo estaminal pelo bioensaio Trad-SHM em *Tradescantia* sp. clone 4430 e por fim, se as concentrações de MP impactam no resultado do bioensaio de Trad-SHM.

Diante disso, temos:

1. As concentrações diárias de MP obtidas nos pontos de monitoramento estiveram dentro dos limites especificados pelo CONAMA 491/2018 ao longo da maior parte do ano, com alguns períodos em que estes limites foram ultrapassados, que correspondem as estações do ano em que a dispersão atmosférica é menos favorável, favorecendo assim a maior concentração de poluentes na atmosfera;
2. Houve a ocorrência de frequência de mutação em pelo estaminal em todos os pontos estudados, sendo mais frequente nos períodos entre o outono e primavera, mesmo período do material particulado, podendo ser notado uma tendência entre os resultados;
3. As comparações entre MP e *Tradescantia* sp. clone 4430, mostraram que os resultados seguiram a mesma tendência de apresentarem as maiores concentrações e mais frequência de mutação em pelo estaminal, no mesmo período do ano;
4. No total de 16 análises entre os pares Trad x MP₁₀ e Trad x MP_{2.5} (teste de *post-hoc*), 9 análises apresentam significância entre elas e 7 não apresentaram, indicando que a concentração de material particulado pode influenciar na ocorrência de mutação em pelo estaminal, mesmo em baixas concentrações;
5. As correlações entre material particulado e frequência de mutação apresentaram valores positivos, variando entre correlação bem fraca a moderada;
6. A média das correlações entre material particulado e a frequência de mutação ficou em $r = 0,45 \pm 0,21$ (correlação moderada), com valor máximo de 0,78 e mínimo de 0,04;
7. O uso da *Tradescantia* sp. clone 4430 com o bioensaio Trad-SHM evidenciou sensibilidade aos ambientes em que foi exposta, sendo que o biomonitoramento é uma ferramenta importante para a compreensão dos efeitos dos poluentes no ecossistema; e
8. O uso de bioindicadores pode ser adotado sempre que se for avaliar e monitorar a qualidade do ar de um local juntamente com um monitor físico ou químico, devido a sua rápida resposta quando exposto aos poluentes e para verificar quais são os efeitos destes poluentes em organismos vivos.

Como sugestões para trabalhos futuros, relata-se:

1. Estabelecer mais pontos de monitoramento de material particulado para Curitiba e região metropolitana, abrangendo mais bairros, para aumentar a espacialização dos dados;
2. Continuar com o biomonitoramento ambiental com a *Tradescantia* sp. clone 4430, incluindo outros tipos de bioensaios para o material particulado;
3. Utilizar os bioindicadores durante todo ano, para verificar se há alterações nas respostas dos bioensaios durante as passagens de meses e as estações do ano e com isso analisar se há algum período crítico;
4. Realizar o monitoramento usando sensores de baixo custo para os demais poluentes presentes no ar, além do MP;
5. Realizar o cálculo para determinar o período de tempo de exposição que a planta precisa ficar para apresentar respostas de mutação às concentrações dos gases poluentes (CO, NO, NO₂, NO_x, O₃ e SO₂);
6. Instalar vasos com *Tradescantia* sp. clone 4430 nos mesmos pontos das estações de monitoramento do IAT;
7. Correlacionar os dados de concentração de poluentes e bioensaios com variáveis meteorológicas.

REFERÊNCIAS

- AGHAJANYAN, E. A.; AVALYAN, R. E.; ATOYANTS, A. L.; AROUTIOUNYAN, R. M. Bioindication of water pollution of Lake Sevan freshwater ecosystem (Armenia) using model test-object. **Limnology and Freshwater Biology**. v.3. p.236-239. 2019.
- AGUIAR, E. F. K. **Calibração de sensores de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar no Distrito Federal**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geociências aplicadas). Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2014.
- ALBUQUERQUE, M. M.; LOPES, W. G. R. Influência da vegetação em variáveis climáticas: estudo em bairros da cidade de Teresina, Piauí. **Revista Ra'e Ga – O espaço geográfico em análise**. v.36. p.38-68. 2016.
- ALMEIDA, R. S. A industrialização e a questão ambiental na região Sudeste do Brasil. **Caminhos da Geografia**. v.4. n.11. p.53-66. 2004.
- ALONSO, C. D.; GODINHO, R. A evolução da qualidade do ar em Cubatão. **Química Nova**. v.15. n.2. p.125-136. 1992.
- ALVES, E. S.; GIUSTI, P. M.; DOMINGOS, M.; SALDIVA, P. H. N.; GUIMARÃES, E. T.; LOBO, D. J. A. Estudo anatômico e foliar do clone híbrido 4430 de *Tradescantia*: alterações decorrentes da poluição aérea urbana. **Revista Brasileira Botânica**. v.24. n.4. p.567-576. 2001.
- ALVES, D. **Estudo dos resultados de monitoramento de ozônio na qualidade do ar na área de influência de uma termoeletrica**. 2015. 72f. Trabalho conclusão de curso (Engenharia Ambiental). Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC. Criciúma. 2015.
- AMORIM, L. C. A. Os biomarcadores e sua aplicação na avaliação da exposição aos agentes químicos ambientais. **Revista Brasileira Epidemiologia**. v.6. supl.1. 2003.
- ANDRÉ, P. A. **Câmara de topo aberto, CTA: construção e uso para observação de potencial tóxico da poluição atmosférica urbana com bioensaios em plantas**. 2007. 118f. tese (Doutorado). Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo. 2007.
- ARNDT, U.; NOBEL, W.; SCHWIZER, B. Bioindikatoren: Möglichkeiten, Grenzen und neue Erkenntnisse. **Stuttgart: Ulmer**. 1987.
- BADURA, M.; BATOG, P.; DRZENIECKA-OSIADACZ, A.; MODZEL, P. Optical particulate matter sensors in PM_{2.5} measurements in atmospheric air. **Web of Conferences**. 2018.
- BAGINSKI, L. C. **Análise de consistência de dados de monitoramento de material particulado obtidos por sensores de baixo custo**. 2019. 90f. Tese (Dissertação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2019.
- BAGLIANO, R. V. Principais organismos utilizados como bioindicadores relatados com uso de avaliadores de danos ambientais. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**. v.2. n.1. 2012.

BALDAUF, R. W.; DEVLIN, R. B.; GEHR, P.; GIANNELLI, R.; HASSETT-SIPPLE, B.; JUNG, H.; MARTINI, G.; MCDONALD, J.; SACKS, J. D.; WALKER, K. Ultrafine particle metrics and research considerations: Review of the 2015 UFP workshop. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v.13. 2016.

BARBÉRIO, A.; LOPES, E. V. S. Análise das mutações nos pelos estaminais de *Tradescantia* (bioensaio Trad-SH) exposta ao ar da cidade de Garatinguetá-SP. **Revista Biociências**. v.18. p.27-34. 2012.

BARBOSA, B. C. **Uso de Vespas Sociais (Vespidae: Polistinae) como Bioindicador de Qualidade Ambiental de Fragmento Urbano de Mata Atlântica**. Rio de Janeiro: Nelson de Azevedo Branco. 2013.

BOIAN, C.; ANDRADE, M. F. Characterization of ozone transport among metropolitan regions. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.27. n.2. p.229–242. 2012.

BRAGA, A.; BÖHM, G. M.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. Poluição atmosférica e saúde humana. **Revista USP**, São Paulo. n.51. p.58-71. 2001.

BRAGA, B. P. F.; HESPANHOL, I.; LOTUFO CONEJO, J. G.; BARROS, M. T. L.; VERAS JUNIOR, M. S.; PORTO, M. F. A.; NUCCI, N. L. R.; EIGER, S.; JULIANO, N. M. A. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Prentice Hall. 2002.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA n.3 de 28 de junho de 1990**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 de agosto de 1990, seção 1, páginas 15937-15939.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA n.382 de 26 de dezembro de 2006**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 de janeiro de 2007, n.1, seção 1, páginas 131-137.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA n.491 de 19 de novembro de 2018**. Dispões sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 de novembro de 2018, n. 223, seção 01, páginas 155-156.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL. **Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar**. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Departamento de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos. Brasília, DF: MMA, 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. 2018.

BUDDE, M.; SCHWARZ, A. D.; MÜLLER, T.; LAQUAI, B.; STREIBL, N.; SCHINDLER, G.; KÖPKE, M.; RIEDEL, T.; DITTLER, A.; BEIGL, M. Potential and limitations of the low-cost SDS011 particle sensor for monitoring urban air quality. **ProScience**. v.5. p.6-12. 2018.

BUSS, D. F.; BAPTISTA, D. F.; NESSIMIAN, J. L. Conceptual basis for the application of biomonitoring on stream water quality programs. **Caderno Saúde Pública, Rio de Janeiro**, v. 19, n. 2. 2003.

CANADIAN CENTER OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY – CCOHS. **How do particulates enter the respiratory system?** Disponível em: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/how_do.html>. 2018.

CARDOSO, T. C. **Biomonitoramento da qualidade do ar com *Tradescantia pallida* (Rose) D. R. Hunt, no município de Criciúma, Santa Catarina.** 2018. 35f. Trabalho Conclusão Curso (Ciências Biológicas). Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Criciúma. 2018.

CARNEIRO, R. M. A. **Bioindicadores vegetais de poluição atmosférica: uma contribuição para a saúde da comunidade.** 2004. 169 f. Dissertação (Mestrado em Enfermagem em Saúde Pública). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.

CARVALHO, H. A. A *Tradescantia* como bioindicador vegetal na monitoração dos efeitos clastogênicos das radiações ionizantes. **Radiologia Brasileira**, v.38 n.6. p.459-462. 2005.

CASTELHANO, F. J. **Qualidade do ar no AUC (aglomerado urbano de Curitiba/PR) - configuração atual e perspectiva no âmbito das mudanças climáticas globais.** 2019. 226p. Tese (Geografia). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2019.

CAVALCANTI, P. M. P. S. **Modelo de gestão da qualidade do ar – abordagem preventiva e corretiva.** 2010. 269f. Tese (Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.

CEBULSKA-WASILEWSKA, A. *Tradescantia* stamen-hair mutation bioassay on the mutagenicity of radioisotope, contaminated air following the Chernobyl nuclear accident and one year later. **Mutation Research**. v.270. p.23-29f 1992.

CHAVES, M. G. D. **Viabilidade do sensor de baixo custo SDS011 para monitoramento de material particulado.** 2021. 107f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2021.

CLEMENTS, A. L.; GRISWOLD, W. G.; JOHNSTON, J. E.; HERTING, M.; THORSON, J.; COLLIER-OXANDALE, A.; HANNIGAN, M. Low-cost air quality monitoring tools: from research to practice (a workshop summary). **Sensors**. v.17. 2017.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Caracterização das estações da rede automática de monitoramento da qualidade do ar na RMSP – Estação Moóca.** p.41. São Paulo: CETESB. 2007.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2012.** São Paulo, 2013. (Série Relatórios).

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2013.** São Paulo, 2014. (Série Relatórios).

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2018**. p.210. São Paulo: CETESB. 2019.

CORPO DE BOMBEIROS DO PARANÁ. Relatório Periódico Geral de Ocorrências – Informações sobre incêndios. Disponível em: <<http://www.bombeiroscascavel.com.br/registroccb/imprensa.php>>. 2021.

COSTA, G. M.; CASSANEGO, M. B. B.; PETRY, C. T.; SASAMORI, M. H.; ENDRES JUNIOR, D.; DROSTE, A. Avaliação da influência do tempo de exposição de *Tradescantia pallida* var. *purpúrea* para biomonitoramento da genotoxicidade do ar atmosférico. **Revista Brasileira de Biociências**. v.13. n.4. p.224-230. 2015.

COUTTS, C.; HAHN, M. G. Green Infrastructure, Ecosystem Services, and Human Health. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v.8. n.12. 2015.

DE TEMMERMAN, L.; BELL, J. N. B.; GARREC, J. P.; KLUMPP, A.; KRAUSE, G. H. M.; TONNEIJCK, A. E. G. Biomonitoring of air pollutants with plants - considerations for the future. **EuroBionet - Urban Air Pollution, Bioindication and Environmental Awareness**. p.337-373. 2001.

DELGADO, L. A.; FELICIANO, M. J. S.; FRARE, L. M.; IGREJAS, G. P. P. Construção de um sistema de baixo custo para a medição de gases e partículas no interior de instalações suínolas e avícolas. SGA'19 - Sustentabilidade na Gestão Ambiental. Inovação e desafios para os países de língua oficial portuguesa. **Atas da Conferência Internacional**. Lisboa, Portugal. 2019.

DERISIO, J. C. Introdução ao Controle de Poluição Ambiental, **Ed. Oficina de Textos**, São Paulo. 2012.

DEVARAKONDA, S.; SEVUSU, P.; LIU, H.; LIU, R.; IFTODE, L.; NATH, B. Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas. In: **Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD international workshop on urban computing**. ACM, p.15. 2013.

ELMINIR, H. K. Dependence of urban air pollutants on meteorology. **Science of the Total Environment**, v.350. n.1-3. p.225-237. 2005.

ENVIRONNEMENT ET TECHNOLOGIE INTERNATIONALE - ETI. **Relatório de estudo de viabilidade do sistema nacional de monitoramento da qualidade do ar**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2000.

EUROPEAN COMMISSION. **Measuring Air Pollution with Low-Cost Sensors [Brochure]**. European Union, EU: Gerboles, M., Spinelle, L., Borowiak, A. 2017.

EVANS, M. F.; SMITH, V. K. Do new health conditions support mortality–air pollution effects? **Journal Environmental Economics and Management**. v.50. p.496-518. 2005.

FERREIRA, M. I.; PETRENKO, H.; LOBO, D. J. A.; RODRIGUES, G. S.; MOREIRA, A.; SALDIVA, P. H. N. In situ monitoring of the mutagenic effects of the gaseous emissions of a solid waste incinerator in metropolitan São Paulo, Brazil, using the *Tradescantia* stamen-hair assay. **Air and Waste Manage Association**. v.50. p.1852-1856. 2000.

FERREIRA, M. I.; RODRIGUES, G. S.; DOMINGOS, M.; SALDIVA, P. H. N. In situ monitoring of mutagenicity of air pollutants in São Paulo city using *Tradescantia*-SHM bioassay. **Brazilian archives of biology and technology**. v.46. n.2. p.253-258. 2003.

FERREIRA, M. I.; DOMINGOS, M.; GOMES, H. A.; SALDIVA, P. H. N.; ASSUNÇÃO, J. V. Evaluation of mutagenic potential of contaminated atmosphere at Ibirapuera Park, São Paulo – SP, Brazil, using the *Tradescantia* stamen-hair assay. **Environmental Pollution**. v.145. p.219-224. 2007.

FREEDMAN, B. **Environmental ecology: The ecological effects of pollution, disturbance and other stresses**. San Diego: Academic Press. 1995.

GENIKOMSAKIS, K. N.; GALATOULAS, N-F.; DALLAS, P. I.; IBARRA, L. M. C.; MARGARITIS, D.; IOAKIMIDIS, C. S. Development and on-field testing of low-cost portable system for monitoring PM_{2.5} concentrations. **Sensors**. v.18. 2018.

GERHARDT, A. Bioindicator species and their use in biomonitoring. In: **Environmental Monitoring I. Encyclopedia of life support systems (EOLSS)**, Developed under the Auspices of the UNESCO. Oxford: Eolss Publishers. 2002.

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**. v.3. n.5. p.434-445. 2011.

GUIMARÃES, E. T.; MACCHIONE, M.; LOBO, D. J. A.; DOMINGOS, M.; SALDIVA, P. H. N. Evaluation of the mutagenic potential of urban air pollution in São Paulo, southeastern Brazil, using the *Tradescantia* stamen-hair assay. **Environmental Toxicology**. v.16. n.6. p.578-584. 2004.

HIEN, D.; BAC, T.; THAM, C.; NHAN, D.; VINH, D. Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations during the monsoon season in Hanoi. **Atmospheric Environmental**. v.36. n.21. p.3473-3484. 2002.

HILL, J.; HORTON, M.; KLING, R.; KRISHNAMURTHY, L. The platforms enabling wireless sensor networks. **Communications of the ACM**, v.47. n.6.p.41-46. 2004.

ICHIKAWA, S. *In situ* monitoring with *Tradescantia* around nuclear power plant. **Environmental Health Perspectives**. v.37. p.145-164. 1981.

ICHIKAWA, S. *Tradescantia* stamen-hair system as an excellent botanical tester of mutagenicity: its responses to ionizing radiations and chemical mutagens, and some synergistic effects found. **Mutation Research**. v.270. p.3-22.1992.

ICHIKAWA, S.; SHIMA, N.; ISHII, C.; KANAI, H.; SANDA-KAMIGAWARA, M.; MATSUURA-ENDO, C. Variation of spontaneous somatic mutation frequency in the stamen hairs of *Tradescantia* clone BNL 02. **Genes & Genetic Systems**. v.71. p.159-165. 1996.

INSTITUO AMBIENTAL DO PARANÁ – IAP. **Relatório anual da qualidade do ar de Curitiba e Região Metropolitana ano de 2015**. Disponível em:

<http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-08/rei_anual_iap_2015_0.pdf>. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA - IBGE. **IBGE Cidades**. Disponível: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - IPARDES. **Caderno Estatístico**. 2019. Disponível em: <<http://www.ipardes.pr.gov.br/>>.

INSTITUTO SAÚDE E SUSTENTABILIDADE. **Análise e monitoramento da qualidade do ar no Brasil**. 2019.

KAPUSTA, S. C. **Bioindicação ambiental**. Porto Alegre: Escola Técnica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 88p. 2008.

KARAGULIAN, F.; GERBOLES, M.; BARBIERE, M.; KOTSEV, A.; LAGLER, F.; BOROWIAK, A. Review of Sensors for Air Quality Monitoring. **Atmosphere**. v.10. n.9. 2019.

KARRA, S.; MALKI-EPSTEIN, L.; NEOPHYTOU, M, K.-A. Air flow and pollution in a real, heterogeneous urban street canyon: A field and laboratory study. **Atmospheric Environment**. v.165. p.370-384. 2017.

KIM, K. H.; KABIR, E.; KABIR, S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. **Environment International**. v.74. p.136-146. 2015.

KLUMPP, A. Utilização de bioindicadores de poluição em condições temperadas e tropicais. In: MAIA, N.B.; MARTOS, H. L.; BARRELLA, W. (Org.). **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo: EDUC – Editora da PUC. p.77-94. 2001.

KONG, M. S.; MA, T. H. Genotoxicity of contaminated soil and shallow well water detected by plant bioassays. **Mutation Research**. v.426. n.2. p.221-228. 1999.

KOWALSKI, R. L. Não bastasse a pandemia, Grande Curitiba tem que lidar com “temporada” de incêndios. Disponível em: <<https://www.bemparana.com.br/noticia/rmc-registra-10-incendios-por-dia-em-media.-temporada-do-fogo-esta-perto#.YTZosrBKjIU>>. 2021.

LAAKSO, L.; HUSSEIN, T.; AARNIO, P.; KOMPPULA, M.; HILTUNEN, V.; VIISANEN, Y.; KULMALA, M. Diurnal and annual characteristics of particle mass and number concentrations in urban, rural and arctic environments in Finland. **Atmospheric Environmental**. v.37. n.19. p.2629-2641. 2003.

LACAVA, C. I. V. **Avaliação da qualidade do ar**. In: **Emissões atmosféricas**. 2003. p.131-180. Disponível em: <http://www.ambiental.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2014/08/Livro_TGA-EA-_cap_2__QUAL_AR.pdf>.

LAU, A. H. **Avaliação múltipla do potencial genotóxico da poluição urbana de Porto Alegre – RS**. 2002. 139f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-graduação em Genética e Biologia Molecular da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002.

LEITE, J. M. B. L. **Aplicabilidade de sensores de baixo custo a redes de monitorização da qualidade do ar**. 2016. Tese (Tecnologias Ambientais). Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. Viseu, Portugal. 2016.

LIMA, V.; AMORIM, M. C. C. T. A importância das áreas verdes para a qualidade ambiental das cidades. **Revista Formação**. n.13. p.139-165. 2006.

LISBOA, H. M.; KAWANO, M. **Monitoramento de poluentes atmosféricos**. In: Controle da poluição atmosférica, capítulo IV. ENS/UFSC. 73p. Montreal. 2007.

LISBOA, H. M.; SCHIRMER, W. N. **Metodologia de controle de poluição atmosférica**. In: Controle da poluição atmosférica, capítulo VII. ENS/UFSC. 93p. Montreal. 2007.

LIU, H-Y.; SCHNEIDER, P.; HAUGENS, R.; VOGT, M. Performance assessment of a low-cost PM_{2.5} sensor for a near four-month period in Oslo, Norway. **Atmosphere**. v.10. 2019.

LOWER, W. R.; DROBNEY, V. K.; HOLT, B. J.; POLITTE, R. Mutagenicity of the environments in the vicinity of an oil refinery and petrochemical complex. **Teratogenesis, Carcinogenesis and Mutagenesis**. v.3. p.65-73. 1983.

MA, T.-H. Micronuclei induced by X-rays and chemical mutagens in meiotic pollen mother cells of *Tradescantia*. A promising mutagen test system. **Mutation Research**. v.64, n.5. p.307-313. 1979.

MA, T. H. *Tradescantia* cytogenetic tests (root-tip mitosis, pollen mitosis, pollen mother-cell meiosis). A report of the U. S. Environmental Protection Agency Gene-Tox Program. **Mutation Research**. v.99, p.293-302. 1982.

MA, T. H.; GRANT, W. F. The *Tradescantias* adventurous plants. **The Herbarist**, v.48, p.36-44. 1982.

MA, T. H.; ANDERSON, V. A.; AHMED, I. Environmental clastogens detected by meiotic pollen mother cells of *Tradescantia*. In: TTCE, R. R.; COSTA, D. L.; SCHAICH, K. M. **Genotoxic Effects of Airborne Agents**. New York: Plenum Press. p.141-157. 1982.

MA, T. H.; CABRERA, G. L.; CEBELUSKA-WASILEWSKA, A.; CHEN, R.; LOARCA, F.; VANDENBERG, A. L.; SALAMONE, M. F. *Tradescantia* stamen hair mutation bioassay. **Mutation Research**. v.310, p.211-220. 1994.

MACHADO, V. **Estudo numérico da dispersão de poluente veicular em uma microrregião urbana**. 2019. 103f. Dissertação (Engenharia Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa-PR. 2019.

MAIA, M.; QUITÉRIO, S. L.; LOPES, R.; LOYOLA, J.; ARBILLA, G. Caracterização de metais traço presentes no material particulado atmosférico inferior a 2,5µm (MP_{2,5}) no entorno de uma área industrial. **Perspectivas da Ciência e Tecnologia**. v.6. p.12. 2014.

MAKI, E. S.; SHITSUKA, R.; BARROQUEIRO, C. H.; SHITSUKA, D. M. Utilização de bioindicadores em monitoramento de poluição. **Biota Amazônica**. v.3. n.2. p.169-178. 2013.

MARIO, M. P. J. **Poluição atmosférica como condicionante no processo de ocupação do espaço urbano: Análise na cidade de Porto Alegre, RS.** 2012. 87f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012.

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

MATSUURA, K. Bioindicadores em Ecossistemas. Organização das Nações Unidas para a Educação. **Ciência e Cultura – Unesco.** 2000.

MAZIVIERO, G. T. **Avaliação do potencial citotóxico, genotóxico e mutagênico de lodo de esgoto por meio dos sistemas-teste *Allium cepa* e *Tradescantia pallida*.** 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro - São Paulo. 2011.

MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITOH, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J.; ZHAO, Z. C. **Global Climate Projections.** In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. v.3495. p. 747-845. 2007.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL. **Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental.** Departamento de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos. Brasília, DF: MMA. 2020.

MIRANDA, A. **Saiba mais sobre a ciência das máscaras e aprenda a aumentar a proteção.** Universidade Federal do Paraná, Extensão e Cultura. 2020.

MIYABE, M.T.; DROSTE, A. Avaliação do potencial genotóxico de cádmio e chumbo por meio do bioensaio com *Tradescantia pallida* (Rose) D.R. Hunt var. purpurea Boom. **Revista Conhecimento Online.** v.3. p.122-136. 2018.

MORAWSKA, L.; THAI, P. K.; LIU, X.; ASUMADU-SAKYI, A.; AYOKO, G.; BARTONOVA, A.; BEDINI, A.; CHAI, F.; CHRISTENSEN, B.; DUNBABIN, M.; GAO, J.; HAGLER, G. S. W.; JAYARATNE, R.; KUMAR, P.; LAU, A. K. H.; LOUIE, P. K. K.; MAZAHERI, M.; NING, Z.; MOTTA, N.; MULLINS, B.; RAHMAN, M. M.; RISTOVSKI, Z.; SHAFIEI, M.; TJONDRONEGORO, D.; WESTERDAHL, D.; WILLIAMS, R. Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? **Environment International.** v.116. p.286-299. 2018

MOREIRA, P. S. P.; DALACORT, R.; LIMA, I. F.; TIEPPO, R. C.; SANTOS, C. Concentração de material particulado na região de Tangará da Serra-MT, sul da Amazônia Lega. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.7. n.6. p.1145-1152. 2014.

NACARATTI, M. A. **Qualidade do ar na cidade do Rio de Janeiro**. Relatório da Rede MonitorAr-RIO, 2011-2012. Rio de Janeiro. 2012.

NALI, C.; CROCICCHI, L.; LORENZINI, G. Plants as indicators of urban air pollution (ozone and trace elements) in Pisa, Italy. **Journal of Environmental Monitoring**. v.6. p.636-645. 2004.

NASCIMENTO, A. R. P. **Monóxido de Carbono e Material Particulado na Atmosfera do Distrito Federal: mapeamento espaço-temporal e processos de geração/atenuação**. 2016. 77p. Projeto final (Ciências ambientais). Universidade de Brasília, Brasília-DF. 2016.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR. 2019.

NOVA FITNESS. Disponível em: <<http://inovafitness.com/en/a/index.html>>. 2015.

NOWAK, D. J. Trees pollute? A “TREE” explains it all, in **Proceedings 7th National Urban Forestry Conference** (C. Kollin, and M. Barratt, eds.), American Forests, Washington, DC, pp. 28–30. 1995.

NOWAK, D. J.; CRANE, D. E.; STEVENS, J. C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. **Urban Forestry & Urban Greening**. v.4. p.115-123. 2006.

NOWAK, D. J.; DWYER, J. F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In: **Urban and community forestry in the Northeast**, capítulo 2. 2ª ed. p.25-46. 2010.

NOWAK, D. J.; HIRABAYASHI, S.; BODINE, A.; GREENFIELD, E. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. **Environmental Pollution**. v.193. p.119-129. 2014.

OLIVARES, G.; LONGLEY, I.; COULSON, G. Development of a Low-cost Device for Observing Indoor Particle Levels Associated With Source Activities in the Home, Proceedings of the International Society of Exposure Science Conference, Seattle, WA, USA 2012.

OLIVARES, G.; EDWARDS, S. The Outdoor Dust Information Node (ODIN) – development and performance assessment of a low-cost ambient dust sensor **Atmospheric Measurement Techniques**. v.8. p.7511-7533. 2015.

OLIVEIRA, D. S. **Avaliação comparativa do risco mutagênico dos poluentes provenientes da combustão dos combustíveis renováveis (álcool e diesel) e não renováveis (gasolina e diesel) através do bioensaio Trad-SH**. 2010. 89p. Tese (Doutorado) Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica e área de Concentração em Térmica e fluidos. Escola de Engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo. 2010.

OLIVEIRA, V. **A qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: a saúde pública como elo central de articulação e suas implicações na gestão integrada saúde e ambiente**. 2008. 164. Tese (Saúde Pública). Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro. 2008.

OLIVEIRA, V.; FERREIRA, A. P. Poluição do ar e saúde ambiental na cidade do Rio de Janeiro: contribuição para a definição de estratégias de monitoramento. **Revista Eletrônica do Prodepa**, v.1. p.7-22. 2007.

ORLANDO, J. P.; ALVIM, D. S.; YAMAZAKI, A.; CORRÊA, S. M.; GATTI, L. V. Ozone precursors for the São Paulo Metropolitan Area. **Science of the Total Environment**. v.408. n.7. p.1612–1620. 2010.

PAPROTNY, I.; DOERING, F.; SOLOMON, P. A.; WHITE, R. M.; GUNDEL, L. A. Microfabricated air-microfluidic sensor for personal monitoring of airborne particulate matter: Design, fabrication and experimental results. **Sensors and Actuators**. p.506-516. 2013.

PARANÁ, **LEI ORDINÁRIA nº 13806 de 2002**. Dispõe sobre as atividades pertinentes ao controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar. Diário Oficial n.6327 de 01 de outubro de 2002.

PARANÁ, SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **RESOLUÇÃO SEMA nº 41 DE 2002**. Define critérios para o controle da qualidade do ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do estado de forma ambientalmente segura.

PARANÁ, SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **RESOLUÇÃO SEMA nº 16 DE 2014**. Define critérios para o controle da qualidade do ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do estado de forma ambientalmente segura. Diário Oficial n.9187 de 15 de abril 2014.

PASQUALOTTO, N.; SENA, M. M. Impactos ambientais urbanos no Brasil e os caminhos para cidades sustentáveis. **Revista Educação Ambiental em Ação**. n.61. 2017.

PATUSSI, C.; BÜNDCHEN, M. Avaliação in situ da genotoxicidade de triazinas utilizando o bioensaio Trad-SHM de *Tradescantia* clone 4430. **Ciência & Saúde Coletiva**. n.18. v.4. p.1173-1178. 2013.

PAULA, S. B. C., **Biomonitoramento como instrumento de detecção de contaminantes ambientais**. Monografia (Planejamento e Gestão Ambiental). 2010. 38f. Universidade Veiga de Almeida, Vitória. 2010.

PEDROSO, A. N. V. **Poluentes Atmosféricos & Plantas Bioindicadoras**. Instituto de Botânica-IBt, São Paulo. 2007.

PEIXOTO, N. H.; FERREIRA, L. S. **Higiene Ocupacional III**. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. 152p. Santa Maria, RS. 2013.

PEREIRA, B. B.; CAMPOR JUNIOR, E. O.; MORELLI, S. In situ biomonitoring of the genotoxic effects of vehicular pollution in Uberlândia, Brazil, using a *Tradescantia* micronucleus assay. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v.87. p.17-22. 2013

PEREIRA, B.; LIMONGI, J. E. Epidemiologia de desfechos na saúde humana relacionados à poluição atmosférica no Brasil: uma revisão sistemática. **Caderno de Saúde Coletiva**. v.23. n.2. p.91-100. 2015.

PLACENCIA, F.; XIMENA, F.; YÁÑEZ, K.; CERECEDA-BALIC, F. *Tradescantia* as a biomonitor for genotoxicity evaluation of diesel and biosiesel exhaust emissions. **Science of the Total Environment**. v.651. p.2597-2605. 2019

PRESTES, M.; FELICIANO, M.; FRARE, L.; ALVES, R.; IGREJAS, G. Desenvolvimento e aplicação de sistemas de baixo custo na avaliação de parâmetro de QAI. **IV Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Ambiente e Tecnologia**. Angra dos Reis, Rio de Janeiro. 2018.

PRÜSS-USTÜN, A.; WOLF, J.; CORVALÁN, C.; BOS, R.; NEIRA, M. World Health Organization – WHO. **Preventing Disease Through Healthy Environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks**. p. 176. 2016.

RAI, A. C.; KUMAR, P.; PILLA, F.; SKOULLOUDIS, A. N.; SABATINO, S. D.; RATTI, C.; YASAR, A.; RICKERBY, D. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. **Science of the total environment**. v.607. n.60. p.691-705. 2017.

RAJASEGARAR, S.; ZHANG, P.; ZHOU, Y.; KARUNASEKERA, S.; LECKIE, C.; PALANISWAMI, M. High resolution spatio-temporal monitoring of air pollutants using wireless sensor networks, Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), **2014 IEEE Ninth International Conference on**, IEEE (2014).

RASCIO, N.; NAVARI-IZZO, F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? **Plant Science**. v.180. p.169-181. 2011.

RASPBERRY PI FOUNDATION. Raspberry Pi 3 Model B+. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/>>.

READ, J. Radiation biology of *Vicia faba* in relation to the general problem. Oxford: Blackwell,. **Medical Journal of Australia**. v. 2. n.6. p.270–283. 1959.

REGGENTE, M.; PETERS, J.; THEUNIS, J.; VAN POPPEL, M.; RADEMAKER, M.; DE BAETS, B.; KUMAR, P. A comparison of strategies for estimation of ultrafine particle number concentrations in urban air pollution monitoring networks. **Environmental Pollution**. v.199. p.209-218. 2015.

RÉGO, A .P. J. **Influência do herbicida Gesapax na atividade microbiana do solo e sua ecotoxicidade**. 2017. Tese (Ciências biológicas). Universidade Estadual Paulista Julio Mesquita. 2017.

RODRIGUES, G. S. **Bioensaios de Toxicidade Genética com *Tradescantia***. Jaguariúna (SP): Embrapa Meio Ambiente, Série Documentos. 56 p. 1999.

ROYAL COLLEGE OF PHYSICIANS – RCP. Every breath we take: the lifelong impact of air pollution. **Report of a working party**. London: RCP, 2016.

RUIZ, E. F.; RABAGO, V. M. E.; LECONA, S. U.; PEREZ, A. B.; MA, T. H. *Tradescantia* micronucleus (Trad-MCN) bioassay on clastogenicity of wastewater and in situ monitoring. **Mutation Research**. v.270. p.45-51. 1992.

SANTANA, E.; CUNHA, K. B.; FERREIRA, A. L.; ZAMBONI, A. Padrões de qualidade do ar: Experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia, **Instituto de Energia e Meio Ambiente**, São Paulo. 2012.

SANTI, A. M. M.; ROSA, A. C.; SUZUKI, R. Y. Monitoramento da qualidade do ar: avaliação de metodologia baseada no licenciamento ambiental. In: XXVII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2000, Porto Alegre. **XXVII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**, 2000.

SANTOS, N. B.; MOURA, C.; ROCHA-LIMA, A. B. C.; LOBO, D. A.; SALDIVA, P. H. N.; BIZETO, L. Utilização de *Tradescantia pallida* purpurea como bioindicadora de agentes tóxicos na água. **UNISANTA BioScience**. v.8. n.3. p.326-335. 2019.

SARRA, S. R.; MÜLFARTH, R. C. K. Impactos das queimadas da região Centro-Oeste do Brasil sobre as cidades do estado de São Paulo. **Brazilian Journal of Development**. v.7. n.5. p.51237-51257. 2021.

SAVÓIA, E. J. L. **Potencial de *Tradescantia pallida* cv. *purpurea* para biomonitoramento da poluição aérea de Santo André**. 2007. 118f. (Dissertação de Mestrado). São Paulo, Faculdade de Medicina. 2007.

SAX, K.; EDMONDS, H. W. Development of male gametophyte in *Tradescantia*. **Botanical Gazette**. v.95, p.156-163. 1933.

SCHAIRER, L. A.; VAN'T HOF, J.; HAYES, C. G.; BURTON, R. M.; DE SERRES, F. J. Exploratory monitoring of air pollutants for mutagenicity activity with the *Tradescantia* stamen hair system. **Environmental Health Perspectives**. v.27. p.51-60. 1978.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HIDRICOS DO ESTADO DO PARANÁ - SEMA; INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ - IAP. **RESOLUÇÃO CONJUNTA SEMA/IAP nº3 de 2017**. Dispõe sobre a implantação do Plano Estadual de Controle da Poluição do Ar e de Proteção da Atmosfera - PROEPAR. Diário Oficial de 21 de junho de 2017.

SHIMAKURA, S. E. Interpretação do coeficiente de correlação. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>>. 2006.

SMALL, J. K. *Tradescantia* Virginiana. Native of the eastern United States. **Addisonia, Colored Illustrations e popular descriptions of plants**. v.7. n.1. 1922.

SNYDER, E. G.; WATKINS, T. H.; SOLOMON, P. A.; THOMA, E. D.; WILLIAMS, R. W.; HAGLER, G. S. W.; SHELOW, D.; HINDIN, D. A.; KILARU, V. J.; PREUSS, P. W. The changing paradigm of air pollution monitoring. **Environmental Science & Technology**. v.47. n.20. p.11369–11377. 2013.

SOUSAN, S., KOEHLER, K., THOMAS, G., PARK, J. H., HILLMAN, M., HALTERMAN, A., PETERS, T. M.. Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols. **Aerosol Science and Technology**. v.50. p.462–473. 2016.

SOUZA, C. P. **Investigação da toxicidade, citotoxicidade e genotoxicidade de uma formulação comercial de 2,4-D (diclorofenoxiacético) utilizando os organismos testes *Allium cepa* e *Tradescantia pallida***. Dissertação (Ciências Biológicas). Universidade Estadual Paulista Instituto de Biociências de Rio Claro, Rio Claro. 2015.

SOUZA, T. S., FONTANETTI, C. S. **Ensaio do Cometa para Avaliação da Qualidade das Águas do Rio Paraíba do Sul, numa área sob influência de uma Refinaria de Petróleo**. 4ª ed. Campinas: DPETRO. 2007.

SPARROW, A. H.; SCHAIRER, L. A. Mutational response in *Tradescantia* after accidental exposure to a chemical mutagen. **Environmental Mutagen Society Newsletter**. v.5. p.16–19. 1971.

SPARROW, A. H.; SPARROW, R. C. Spontaneous somatic mutation frequencies for flower in several *Tradescantia* species and hybrids. **Environmental and Experimental Botany**. v. 16. 1976.

STEINITZ, L. M. The effect of lack of oxygen on meiosis in *Tradescantia*. **American Journal of Botany**. v.31. p.428 -443. 1944.

STEINLE, S.; REIS, S.; SABEL, C. E.; SEMPLE, S.; TWIGG, M. M.; BRABAN, C. F.; LEESON, S. R.; HEAL, M. R.; HARRISON, D.; LIN, C.; WU, H. Personal exposure monitoring of PM_{2.5} in indoor and outdoor microenvironments Sci. **Total Environmental**. v.508. p.383-394. 2015.

STRUFFALDI-DE-VUONO, Y. **Fitossociologia do estrato arbóreo da floresta da reserva biológica do instituto de botânica (São Paulo-SP)**. (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo. 1985.

SUTER, G. W. Applicability of indicator monitoring to ecological risk assessment. **Ecological Indicators**. v.1. p.101-112. 2001.

TAGLE, M.; ROJAS, F.; REYES, F.; VÁSQUEZ, Y.; HALLGREN, F.; LINDÉN, J.; KOLEV, D.; WATNE, A. K.; OYOLA, P. Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. **Environmental Monitoring Assess.** v.192. 2020.

TAKAHASHI, C.; ICHIKAWA, S. Variation of spontaneous mutation frequency in *Tradescantia* stamen hairs under natural and controlled environmental conditions. **Environmental and Experimental Botany**. v.16. p.287-293. 1976.

TAVARES, R. A. D. **Poluição atmosférica da cidade de São Paulo e a periderme caulinar do pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.-Leguminosae/Caesalpinioideae)**. 2005. 102f. (Dissertação de Mestrado). Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente. São Paulo. 2005.

TOWAKEI, P.; GUNESS, S. P.; SEEAM, A.; BEKAROO, G. Air quality monitoring in Mauritius. Conference: 2018 **International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications**. 2018.

TORRES, F. T. P.; MARTINS, L. A. Fatores que influenciam na concentração do material particulado inalável na cidade de Juiz de Fora (MG). **Caminhos da Geografia**. v.4. n.16. p.23-39. Outubro. 2005.

UNDERBRINK, A. G.; SPARROW, R.; SPARROW, A. H.; ROSSI, H. H. Relative biological effectiveness of X-Rays and 0.43 MeV monoenergetic integrity on somatic mutations and loss of reproductive integrity in *Tradescantia* stamen hairs. *Radiation Research*. v.44. n.1. p.187-203. 1970.

UNDERBRINK, A. G.; SCHAIRER, L. A.; SPARROW, A. H. *Tradescantia* stamen hairs: a radiobiological test system applicable to chemical mutagenesis. In: Hollaender, A., (Ed). **Chemical Mutagens - Principles and Methods for Their Detection**. New York: Plenum Press, p.171-207. 1973.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – US EPA. **Air sensors 2013: Data Quality & Applications**. EPA's Next Generation Air Monitoring Workshop Serie. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/airsensors2013/final-materials>>. 2013.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – US EPA. **Particulate Matter (PM) Pollution**. 2018. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>>. 2018

WANG, F.; CHEN, D. S.; CHENG, S. Y.; LI, J. B.; LI, M. J.; REN, Z. H. Identification of regional atmospheric PM10 transport pathways using HYSPLIT, MM5-CMAQ and synoptic pressure pattern analysis. **Environmental Modelling and Software**. v.25. n.8. p.927–934. 2010.

WANG, Y., LI, J., JING, H., ZHANG, Q., JIANG, J., BISWAS, P. Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement. **Aerosol Science and Technology**. v.49. p.1063–1077. 2015.

WATSON, L.; DALLWITZ, M. J. **The families of flowering plants: descriptions, illustrations, identification and information retrieval**. 1992.

WHITE, P. A.; CLAXTON, L. D. Mutagens in contaminated soil: a review. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*. v.567. n.2. p.227-345. 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Air quality guidelines global update – Report on a Working Group meeting**. Bonn: WHO. 2005.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Air quality guidelines: global update 2005:** particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide. World Health Organization. 2006.

YAMASHITA, A. *Tradescantia* in studies of genetic effects of low level radiation. **Hoken Butsuri**. v.11. p.263-274. 1976.

ZAKARIA, N.; ABDULLAH, J.; YUSOF, A.; AZIZAN, M.; KIMPOL, N. A study of rice husk total suspended particles (TSP) level using optical sensor in a rice mill factory **International Journal of Energy and Power Engineering. Research**. v.2. p.29-33. 2014.

APÊNDICE A – CÓDIGO PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS DO SENSOR SDS011

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: UTF-8 -*-
import serial, time, struct, array
import datetime
import os

hora = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H:%M:%S")

myCmd = 'mkdir /home/pi/Lactea/'+str(hora)
os.system(myCmd)

myCmd = 'sudo mv /home/pi/Lactea/*.txt /home/pi/Lactea/' + str(hora)
os.system(myCmd)

write_to_file_path = "/home/pi/Lactea/medicoes-SDS011-PM25_JDAMERICAS.txt";
output_file = open(write_to_file_path, "w+");

write_to_file_path2 = "/home/pi/Lactea/medicoes-SDS011-PM10_JDAMERICAS.txt";
output_file2 = open(write_to_file_path2, "w+");

ser = serial.Serial()
ser.port = "/dev/ttyUSB0" # Set this to your serial port
ser.baudrate = 9600

ser.open()
ser.flushInput()

#line = 'Resultados do sensor SDS011 NOVA PM'
line = 'ano-mes-dia horario | nome | concentracaoJDAMERICAS | unidade'
print(line)
output_file.write(line)
output_file.write('\n')
output_file.close()
output_file2.write(line)
output_file2.write('\n')
output_file2.close()

byte, lastbyte = "\x00", "\x00"
cnt = 0
while True:
    lastbyte = byte
    byte = ser.read(size=1)
    # print("Got byte %x" %ord(byte))
    # We got a valid packet header
    if lastbyte == b'\xaa' and byte == b'\xc0':
        sentence = ser.read(size=8) # Read 8 more bytes
        # print "Sentence size {}".format(len(sentence))
        readings = struct.unpack('<hhxccc',sentence) # Decode the packet - big endian, 2
shorts for pm2.5 and pm10, 2 reserved bytes, checksum, message tail
        # print array.array('B',sentence)
        pm_25 = readings[0]/10.0
        pm_10 = readings[1]/10.0
        # ignoring the checksum and message tail

    if (cnt == 0 ):
        #line = " | PM 2.5, {} ,µg/m^3; PM 10, {} ,µg/m^3".format(pm_25, pm_10)

        line = " | PM2.5 | {:.2f} | µg/m^3".format(pm_25)
        line2 = " | PM10 | {:.2f} | µg/m^3".format(pm_10)

        horario = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H:%M:%S")
        print(horario+line)
        print(horario+line2)
        output_file = open(write_to_file_path,"a")
        output_file.write(horario+line)
        output_file.write('\n')
        output_file.close()
        output_file2 = open(write_to_file_path2,"a")
        output_file2.write(horario+line2)
        output_file2.write('\n')
        output_file2.close()

    cnt += 1
    if (cnt == 5):
        cnt = 0
```

APÊNDICE B – CÓDIGO PARA TRANSMISSÃO DOS ARQUIVOS GERADOS NA AQUISIÇÃO DOS DADOS

```
#!/bin/bash
while true
do
—→./dropbox_uploader.sh upload /home/pi/Lactea jdamericas
—→sleep 60
done
```

APÊNDICE C – CÓDIGO PARA LEITURA DOS DADOS EM .TXT PARA CONVERTER EM .CSV

```

import os
import pandas as pd
import datetime
import numpy

def arruma(ARQ):
    ler=open(ARQ+".txt","r")
    N=ler.readlines()
    ler.close()
    esc=open(ARQ+".aux","w")
    for I in range(len(N)):
        A=N[I].split()
        #print(len(A))
        if len(A)==8:
            esc.write('{0} {1},{2},{3},{4}\n'.format(A[0],A[1],A[3],A[5],A[7]))
        if len(A)==7:
            esc.write('{0} {1},{2},{3},{4}\n'.format(A[0],A[1],A[3],A[5],A[6]))
    esc.close()

arqs=[ '2019-10-10_13_45_16/medicoes-SDS011-PM10_JDAMERICAS.txt',
       'medicoes-SDS011-PM10_JDAMERICAS.txt'
       ]

colunas=[ 'concentracaoJDAMERICAS',
          'concentracaoJDAMERICAS' ]

result = pd.DataFrame()

for k in range(len(arqs)):
    nome=arqs[k]
    nome=nome[:-4]
    print(nome)
    arruma(nome)
    dt=pd.read_csv(nome+".aux",sep=',',index_col=0)

    #system("del "+nome+".aux")
    dt.index=pd.to_datetime(dt.index)
    conc_media_minuto=dt.resample('min').mean()
    #result = pd.concat([result, conc_media_minuto], axis=1, sort=False)
    result = pd.concat([result, conc_media_minuto])

    print('Data/horário início : ',dt[colunas[k]].index[0])
    print('Data/horário final   : ',dt[colunas[k]].index[-1])

result_todos.to_csv('serie-completa-JDAMERICAS-pm10.csv')

```

APÊNDICE D – CÓDIGO PARA VERIFICAR O DIA DE MAIOR CORRELAÇÃO

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-
#
#####
#####
import pandas as pd
from os import system
import numpy
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
import datetime
import os
import scipy.stats
#####
#####
#####
#####
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
import matplotlib

## Configura as fontes do gráfico
matplotlib.rc('text', usetex=True)
matplotlib.rc('font', **{'family': 'serif', 'serif': ['Computer Modern Roman, Times']})
matplotlib.rc('text.latex', unicode=True)
#####
#####
arqs=['_Resample_MP10-BATEL-outubro.csv',
      '_Resample_MP10-BATEL-novembro.csv',
      '_Resample_MP10-BATEL-dezembro.csv',
      '_Resample_MP10-BATEL-janeiro.csv',
      '_Resample_MP10-BATEL-fevereiro.csv']

colunas=['concentracaoBATEL',
         'concentracaoBATEL',
         'concentracaoBATEL',
         'concentracaoBATEL',
         'concentracaoBATEL']

ConcMP = pd.DataFrame()

for k in range(len(arqs)):
    nome=arqs[k]
    print(nome)
    dt=pd.read_csv(nome,sep=',',index_col=0)

    #system("del "+nome+".aux")
    dt.index=pd.to_datetime(dt.index)
    conc_media_minuto=dt.resample('min').mean()
    ConcMP = pd.concat([ConcMP, conc_media_minuto])
```

```

mydateparser = lambda x: pd.datetime.strptime(x, "%d/%m/%Y")
MutaTrad=pd.read_csv("batel_flores1.csv",sep=';', date_parser=mydateparser, index_col=0)
MutaTrad.index=pd.to_datetime(MutaTrad.index)
print('Data/horário início : ',MutaTrad.index[0])
print('Data/horário final : ',MutaTrad.index[-1])

import datetime as dt

MutaTrad.index

correlacoes = []
numero_dias = []

for periodo_media in range(3,200):
    #print(periodo_media)

    datas_medicao_Trad = MutaTrad.index.values
    #datas_medicao_Trad

    data_inicio      = datas_medicao_Trad[0:-1]
    data_final       = datas_medicao_Trad[1:]
    data_final_17dias = MutaTrad[0:-1].index - dt.timedelta(days=periodo_media)
    data_final_17d_ar = data_final_17dias.values # array

    aux = (MutaTrad['Mutacoes']/MutaTrad['nr pelos'])*1000
    dados_Trad = aux[1:].values
    #dados_Trad

    leatrice = pd.DataFrame()

    for k in range(len(data_inicio)):
        #print(k,str(data_final_17d_ar[k]),str(data_inicio[k]))
        dias = ConcMP.loc[str(data_final_17d_ar[k]):str(data_inicio[k])]
        leatrice = pd.concat([leatrice, dias.mean()])

    MP_janelas = leatrice.values

    Completo = MutaTrad[1:]
    Completo['Mutacoes/Flor'] = dados_Trad
    Completo['Concentracoes'] = MP_janelas

    x = Completo['Concentracoes'].values
    y = Completo['Mutacoes/Flor'].values

    # First fit with NumPy, then name the coefficients obtained a_1n, a_0n:
    #a_1new, a_0new = numpy.polyfit(x,y, 1)
    #f_linear = numpy.poly1d((a_1new, a_0new))

    # coeficiente de correlação de Pearson
    print(periodo_media,scipy.stats.pearsonr(x,y)[0])
    correlacoes.append(scipy.stats.pearsonr(x,y)[0])
    numero_dias.append(float(periodo_media))

type(correlacoes)

```

```
a_corr = numpy.array(correlacoes)
a_corr.max()
a_corr[20:50]
a_corr[31]
numero_dias[31]
```

APÊNDICE E – GRÁFICOS DA ANÁLISE TEMPORAL DE CORRELAÇÃO DE MP₁₀ E MP_{2.5}

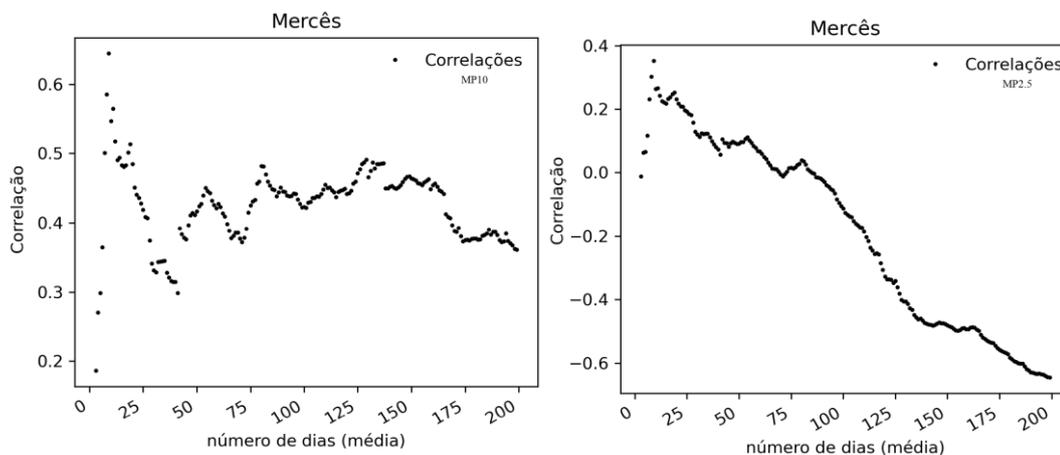


Figura E.1 – Análise temporal do período de correlação para MP₁₀ e MP_{2.5} para o ponto Mercês.

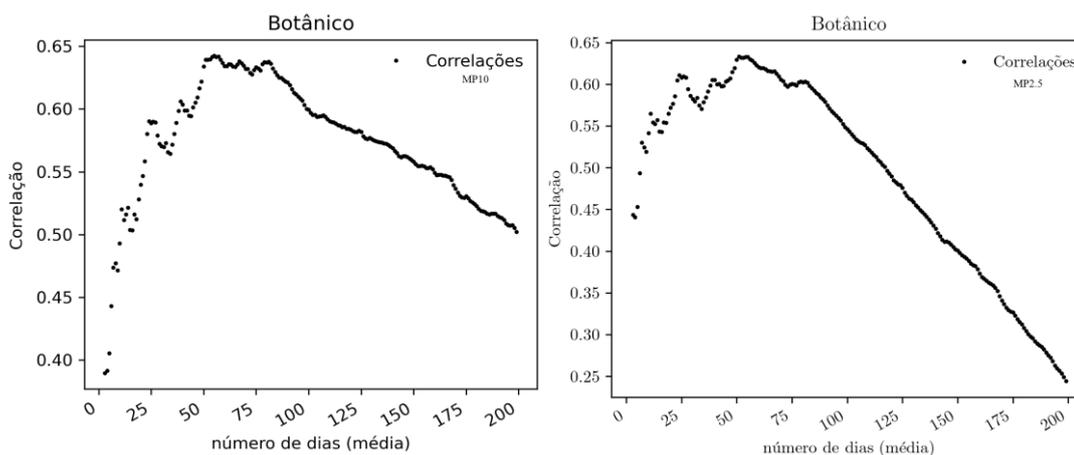


Figura E.2 – Análise temporal do período de correlação para MP₁₀ e MP_{2.5} para o ponto Jd. Botânico.

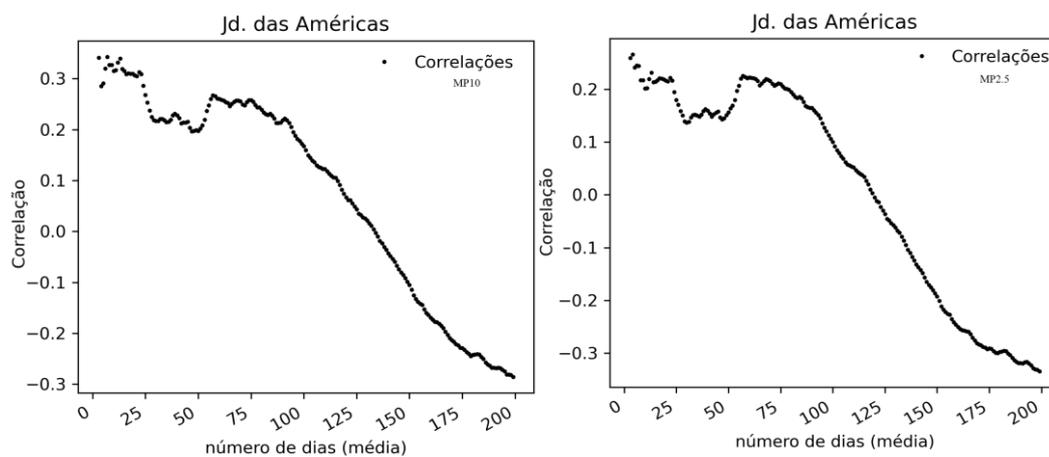


Figura E.3 – Análise temporal do período de correlação para MP₁₀ e MP_{2.5} para o ponto Jd. das Américas.

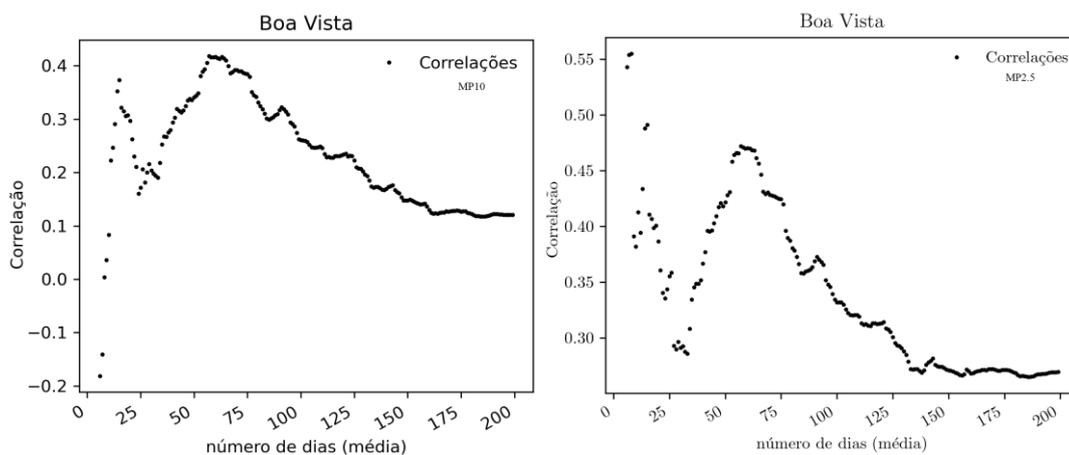


Figura E.4 – Análise temporal do período de correlação para MP₁₀ e MP_{2.5} para o ponto Boa Vista.

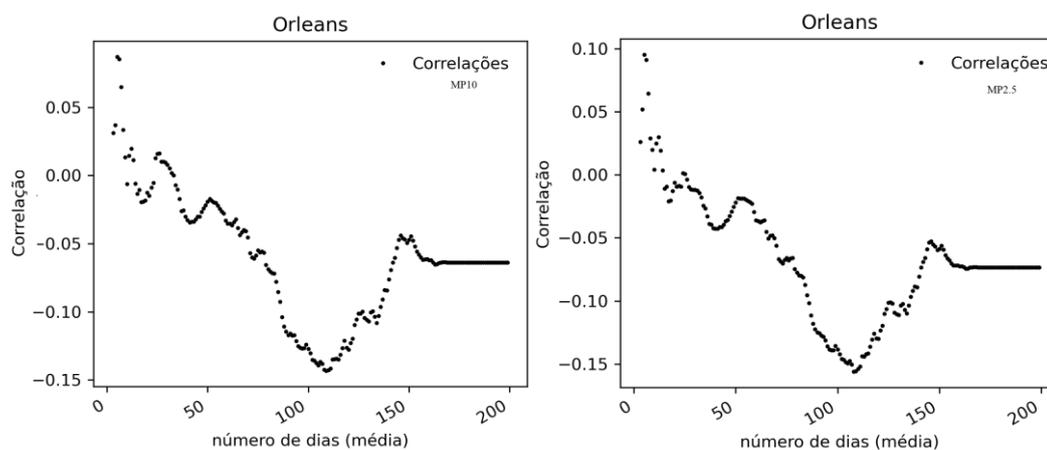


Figura E.5 – Análise temporal do melhor período de correlação para MP₁₀ e MP_{2.5} para o ponto Orleans.

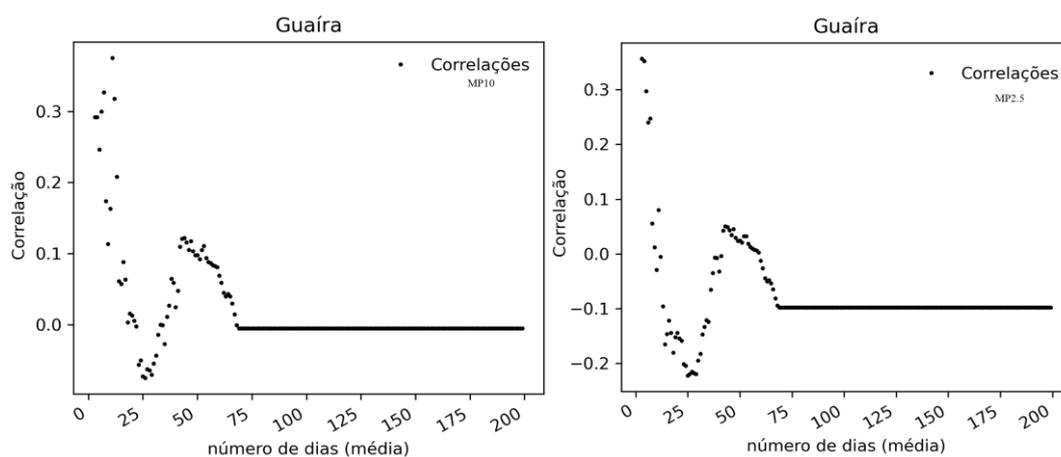


Figura E.6 – Análise temporal do período de correlação para MP₁₀ e MP_{2.5} para o ponto Guaira.

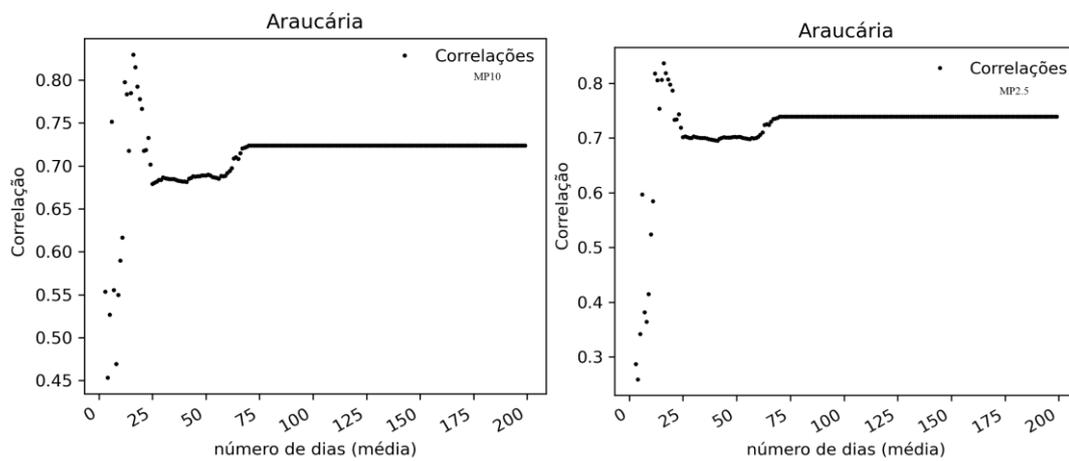


Figura E.7 – Análise temporal do período de correlação para MP₁₀ e MP_{2.5} para o ponto Araucária.

ANEXO A– FICHAS DE IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DE MONITORAMENTO

Quadro A.1 – Descrição da Estação Batel.

Identificação de estação de monitoramento da qualidade do ar				
Nome	Estação Batel			
Número de série SDS011	5001-F0FF			
Coordenada (SIRGAS 2000)	-25.436777, -49.289181			
Topografia/altitude	930 metros			
Endereço	Alameda Doutor Carlos de Carvalho, 1523			
Característica do solo no entorno (20 m)	Pavimentada e grama			
Contagem de veículos Ano	Em elaboração			
Vias relevantes mais próximas	Rua Francisco Rocha			
	Rua Alferes Ângelo Sampaio			
	Alameda Doutor Carlos de Carvalho			
	Av. Visc. de Guarapuava			
Principais fontes (industriais e/ou móveis)	Veiculares e chaminés de pequenos estabelecimentos do ramo alimentício			
Parâmetros medidos	MP2,5	MP10	Umidade	Temperatura
Tipo de monitoramento	A (automático)			
Escala espacial	Bairro			
Início do monitoramento	10/2019			
Frequência do monitoramento	Contínuo			

Quadro A.2 – Descrição da Estação Mercês.

Identificação de estação de monitoramento da qualidade do ar				
Nome	Estação Mercês			
Número de série SDS011	5003-12AD			
Coordenada (SIRGAS 2000)	-25.425985, -49.287201			
Topografia/altitude	940 metros			
Endereço	Rua Desembargador Motta, 3428			
Característica do solo no entorno (20 m)	Pavimentada e grama			
Contagem de veículos Ano	Em elaboração			
Vias relevantes mais próximas	Av. Manoel Ribas			
	Rua Júlia Wanderley			
	Rua Padre Agostinho			
	Rua Padre Anchieta			
	Rua Desembargador Motta			
	Rua Brigadeiro Franco			
Principais fontes (industriais e/ou móveis)	Veiculares			
Parâmetros medidos	MP2,5	MP10	Umidade	Temperatura
Tipo de monitoramento	A (automático)			
Escala espacial	Bairro			
Início do monitoramento	11/2019			
Frequência do monitoramento	Contínuo			

Quadro A.3 – Descrição da Estação Jardim Botânico.

Identificação de estação de monitoramento da qualidade do ar				
Nome	Estação Jd. Botânico			
Número de série SDS011	5002-9593			
Coordenada (SIRGAS 2000)	-25.437698, -49.252419			
Topografia/altitude	890 metros			
Endereço	Rua Engenheiro Leão Sounis, 429			
Característica do solo no entorno (20 m)	Pavimentada e grama			
Contagem de veículos Ano	Em elaboração			
Vias relevantes mais próximas	Av. Presidente Affonso Camargo			
	Av. Prefeito Omar Sabbag			
	Av. Comendador Franco (Avenida das Torres)			
	Av. Engenheiro Rebouças			
	Av. Dr. Dario Lopes dos Santos			
Principais fontes (industriais e/ou móveis)	Veiculares			
Parâmetros medidos	MP2,5	MP10	Umidade	Temperatura
Tipo de monitoramento	A (automático)			
Escala espacial	Bairro			
Início do monitoramento	10/2019			
Frequência do monitoramento	Contínuo			

Quadro A.4 – Descrição da Estação Jardim das Américas.

Identificação de estação de monitoramento da qualidade do ar				
Nome	Estação Jd. Das Américas			
Número de série SDS011	5001-F124			
Coordenada (SIRGAS 2000)	-25.450927, -49.232396			
Topografia/altitude	880 metros			
Endereço	UFPR, Campus Politécnico			
Característica do solo no entorno (20 m)	Pavimentada e grama			
Contagem de veículos Ano	Em elaboração			
Vias relevantes mais próximas	Av. Comendador Franco			
	BR-277			
	Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos			
	Rodovia Régis Bittencourt (Linha Verde)			
	Rua Evaristo Ferreira da Costa			
Principais fontes (industriais e/ou móveis)	Veiculares			
Parâmetros medidos	MP2,5	MP10	Umidade	Temperatura
Tipo de monitoramento	A (automático)			
Escala espacial	Bairro			
Início do monitoramento	10/2019			
Frequência do monitoramento	Contínuo			

Quadro A.5 – Descrição da Estação Boa Vista.

Identificação de estação de monitoramento da qualidade do ar				
Nome	Estação Boa Vista			
Número de série SDS011	5002-9806			
Coordenada (SIRGAS 2000)	-25.390575, -49.254514			
Topografia/altitude	950 metros			
Endereço	Rua Leão Sallum, 1394			
Característica do solo no entorno (20 m)	Pavimentada e grama			
Contagem de veículos Ano	Em elaboração			
Vias relevantes mais próximas	Av. Paraná			
	Av. Anita Garibaldi			
	Rua Jovino do Rosário			
	Rua Holanda			
Principais fontes (industriais e/ou móveis)	Veiculares			
Parâmetros medidos	MP2,5	MP10	Umidade	Temperatura
Tipo de monitoramento	A (automático)			
Escala espacial	Bairro			
Início do monitoramento	08/2019			
Frequência do monitoramento	Contínuo			

Quadro A.6 – Descrição da Estação Orleans.

Identificação de estação de monitoramento da qualidade do ar				
Nome	Estação Orleans			
Número de série SDS011	5002-9823			
Coordenada (SIRGAS 2000)	-25.428546, -49.350547			
Topografia/altitude	950 metros			
Endereço	Rua Adir Dalabona, 205			
Característica do solo no entorno (20 m)	Pavimentada e grama			
Contagem de veículos Ano	Em elaboração			
Vias relevantes mais próximas	Av. Ver. Toaldo Túlio			
	Rua Izidoro Langa			
	Rua Virgínia Dalabona			
	Rua Ubaldo Brunatti			
	Rua Alberto Panek			
	BR-376 (Rodovia do Café)			
Principais fontes (industriais e/ou móveis)	Veiculares			
Parâmetros medidos	MP2,5	MP10	Umidade	Temperatura
Tipo de monitoramento	A (automático)			
Escala espacial	Bairro			
Início do monitoramento	10/2019			
Frequência do monitoramento	Contínuo			

Quadro A.7 – Descrição da Estação Guaira.

Identificação de estação de monitoramento da qualidade do ar				
Nome	Estação Guaira			
Número de série SDS011				
Coordenada (SIRGAS 2000)	-25.46965, -49.28301			
Topografia/altitude	922 metros			
Endereço	Avenida Presidente Kennedy, 2929			
Característica do solo no entorno (20 m)	Pavimentada e grama			
Contagem de veículos Ano	Em elaboração			
Vias relevantes mais próximas	Avenida Presidente Kennedy			
Principais fontes (industriais e/ou móveis)	Veiculares			
Parâmetros medidos	MP2,5	MP10	Umidade	Temperatura
Tipo de monitoramento	A (automático)			
Escala espacial	Bairro			
Início do monitoramento	07/2020			
Frequência do monitoramento	Contínuo			

Quadro A.8 – Descrição da Estação Araucária.

Identificação de estação de monitoramento da qualidade do ar				
Nome	Estação Araucária			
Número de série SDS011	5002-74C1			
Coordenada (SIRGAS 2000)	-25.576283, -49.396009			
Topografia/altitude	894 metros			
Endereço	Rua Dr. Vital Brasil, 396, Bairro Estação			
Característica do solo no entorno (20 m)	Pavimentada e grama			
Contagem de veículos Ano	Em elaboração			
Vias relevantes mais próximas	Dr. Vital Brasil Rodovia do Xisto (2 km de distância)			
Principais fontes (industriais e/ou móveis)	Indústrias (CSN, Repar e Cocelpa) e veiculares			
Parâmetros medidos	MP2,5	MP10	Umidade	Temperatura
Tipo de monitoramento	A (automático)			
Escala espacial	Bairro			
Início do monitoramento	07/2019			
Frequência do monitoramento	Contínuo			

ANEXO B – CERTIFICADOS DE CE/FCC/RoHS, VERIFICAÇÃO E CONFORMIDADE DO SENSOR SDS011



Figura B.1 – Certificado Sensor SDS011.
Fonte: NOVA FITNESS.



Figuras B.2e B.3 – Certificados de Verificação e Conformidade do Sensor SDS011.
Fonte: NOVA FITNESS.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Martin Luther King