

## **Panorama das pesquisas sobre monitoramento da qualidade do ar com a utilização de biomonitores**

Overview of research on air quality monitoring using biomonitors

Descripción general de la investigación sobre el monitoreo de la calidad del aire utilizando biomonitores

Recebido: 31/05/2023 | Revisado: 11/06/2023 | Aceitado: 12/06/2023 | Publicado: 16/06/2023

**Rubem Alves de Lima**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2165-1921>  
Universidade Federal da Paraíba, Brasil  
E-mail: [rubem.al@hotmail.com](mailto:rubem.al@hotmail.com)

**Elidianne Layanne Medeiros de Araújo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8774-8924>  
Universidade Federal da Paraíba, Brasil  
E-mail: [elidiannemedeiros@gmail.com](mailto:elidiannemedeiros@gmail.com)

### **Resumo**

O presente estudo tem como objetivo revisar a literatura que trata do emprego de biomonitores para avaliação da qualidade do ar, no Brasil. Utilizou-se como método a revisão integrativa que investigou a produção do conhecimento sobre o tema. Para isso, recorreu-se às bases de dados Google Acadêmico, SciELO e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), estabelecendo como recorte temporal o período entre 2019 e 2022. Os termos de busca utilizados foram “biomonitoramento”, “biomonitor” e “bioindicador” para maior abrangência do tema e retorno de resultados mais representativos. Foram identificados 68 estudos brasileiros que preencheram os critérios iniciais de inclusão. Em seguida, os trabalhos passaram por 3 fases de filtragem, tendo como elementos de análise: (i) os títulos, (ii) os resumos e conclusões e, por último, (iii) os textos completos. Ao final, restaram 6 estudos que efetivamente versaram sobre o tema. Após análise da produção científica, concluiu-se que, apesar das limitações em decorrência de alguns fatores como os meteorológicos e os relativos à fisiologia e anatomia dos vegetais, os biomonitores apresentam bons resultados quando utilizados para monitoramento da qualidade do ar.

**Palavras-chave:** Poluição do ar; Biomonitoramento; Biomonitor; Material particulado.

### **Abstract**

This study aims to review the literature that deals with the use of biomonitors to assess air quality in Brazil. The integrative review that investigated the production of knowledge on the subject was used as a method. For this, Google Scholar, SciELO and the Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations (BDTD) databases were used, establishing the period between 2019 and 2022 as a time frame. The search terms used were “biomonitoramento”, “biomonitor” and “bioindicador” for greater coverage of the topic and return of more representative results. We identified 68 Brazilian studies that met the initial inclusion criteria. Then, the works went through 3 filtering phases, having as elements of analysis: (i) titles, (ii) abstracts and conclusions and, finally, (iii) full texts. In the end, there were 6 studies that effectively dealt with the subject. After analyzing the scientific production, it was concluded that, despite the limitations due to some factors such as meteorological factors and those related to the physiology and anatomy of plants, biomonitors present good results when used to monitor air quality.

**Keywords:** Air Pollution; Biomonitoring; Biomonitor; Particulate matter.

### **Resumen**

Este estudio tiene como objetivo revisar la literatura que trata sobre el uso de biomonitores para evaluar la calidad del aire en Brasil. Se utilizó como método la revisión integradora que investigó la producción de conocimiento sobre el tema. Para ello, se utilizaron las bases de datos Google Scholar, SciELO y la Biblioteca Digital Brasileña de Tesis y Disertaciones (BDTD), estableciendo como marco temporal el período comprendido entre 2019 y 2022. Los términos de búsqueda utilizados fueron “biomonitoramento”, “biomonitor” y “bioindicador” para una mayor cobertura del tema y retorno de resultados más representativos. Identificamos 68 estudios brasileños que cumplieron con los criterios de inclusión iniciales. Luego, los trabajos pasaron por 3 fases de filtrado, teniendo como elementos de análisis: (i) títulos, (ii) resúmenes y conclusiones y, finalmente, (iii) textos completos. Al final, hubo 6 estudios que efectivamente trataron el tema. Luego de analizar la producción científica, se concluyó que, a pesar de las limitaciones debidas a

algunos factores como los meteorológicos y los relacionados con la fisiología y anatomía de las plantas, los biomonitores presentan buenos resultados cuando se utilizan para monitorear la calidad del aire.

**Palabras clave:** Polución del aire; Biomonitorio; Biomonitor; Material particulado.

## 1. Introdução

Há anos o ser humano tem procurado conhecer sobre a biodiversidade e utilizar esses conhecimentos para melhorar a qualidade de vida. Algumas plantas, por exemplo, são eficientes para identificação de poluentes atmosféricos de origens natural e/ou antrópica, por meio do chamado biomonitoramento associado a técnicas físico-químicas complementares de análise. Como se sabe, a busca por soluções para problemas relacionados à poluição do ar, que representam uma enorme ameaça ao meio ambiente e à saúde das populações, tem crescido devido ao aumento das taxas de emissões relacionadas, principalmente, à industrialização, ao crescimento das frotas de veículos e, conseqüentemente, ao consumo de combustíveis fósseis (Dapper, et al., 2016).

Nesse cenário, os biomonitores têm sido apresentados como alternativa aos monitores mecânicos, que possuem maior complexidade e considerável custo financeiro. Além do mais, os biomonitores podem trazer benefícios sociais, econômicos e ambientais, uma vez que permitem a substituição de alguns processos químicos por outros mais sustentáveis, baseados no uso de matérias-primas renováveis (Santos, et al., 2018).

Nesse sentido, Guarino et al. (2021) lembram que a abordagem de biomonitoramento é um método confiável e barato para avaliação da qualidade do ar. A capacidade das plantas de acumular contaminantes nos diferentes órgãos ou tecidos (frutos, raízes, caule ou folhas) tem sido mundialmente explorada. As partículas de poeira afetam a fisiologia das plantas, alterando vários parâmetros fisiológicos e bioquímicos delas. Os pecíolos das folhas, por exemplo, são um dos mais excelentes dispositivos de captura de poluentes através da absorção e difusão (Karmakar, et al., 2021).

Ainda se sabe que as reações das plantas bioindicadoras devido aos poluentes podem ser presenciadas tanto em escala macroscópico (com o aparecimento de cloroses, queda e diminuição no crescimento das folhas e necroses) como em nível genético, fisiológico, estrutural ou bioquímico. Ademais, conforme a finalidade, o biomonitoramento pode ser do tipo qualitativo, que é baseado em decisões tipo sim/não (como atributos dos vegetais que se alteram como resposta a influências dos poluentes) ou quantitativo, que mensura a contaminação atmosférica por determinados poluentes. Esse último tipo requer mais esforço, exigindo algumas padronizações (Ellenberg, 1991; Klumpp, et al., 2004).

Assim, o biomonitoramento tem se apresentado como uma estratégia confiável para análise dos efeitos da poluição do ar e a utilização de organismos sésseis, como líquens ou plantas, que estão continuamente expostos aos efeitos ambientais, é uma alternativa promissora (Haverić, et al., 2022). Vários estudos estão sendo realizados no mundo com o emprego dessa técnica. Dhaouadi et al. (2022), por exemplo, monitoraram 4 elementos (Pb, Ni, Cd e Zn) por meio de 23 espécies de líquens. Eles perceberam as espécies de líquens com seus diferentes tipos de talos fornecem respostas diferentes no que diz respeito à bioacumulação. O estudo mostrou que as espécies *Xanthoria Parietina*, *Physcia adscendens* e *Cladonia Stellaris* são as mais acumulativas.

Em outro estudo, Lucadamo et al. (2022), por meio do biomonitoramento com o líquen *Pseudevernia furfuracea*, perceberam que o aumento do tráfego ao longo do tempo influenciou o aumento da bioacumulação de Cu, Sb e Mo. Já os pesquisadores Kousehlar e Widom (2020) utilizaram o biomonitoramento com líquen para identificar as fontes de metais tóxicos atmosféricos em Middletown, Ohio. Eles conseguiram determinar a fonte de material particulado (MP) e as concentrações de metais tóxicos. Assim, descobriu-se que essas concentrações foram elevadas em amostras de líquens próximas a uma usina siderúrgica. Evidenciou-se, ainda, que emissões significativas de isótopos de Pb estavam relacionadas ao tráfego.

O objetivo deste artigo consiste em revisar a literatura que trata do emprego do biomonitoramento para avaliação da qualidade do ar, no Brasil.

## **2. Metodologia**

Este estudo é classificado como pesquisa bibliográfica integrativa e possui caráter descritivo. É bibliográfica por ter sido desenvolvida a partir de material já elaborado como artigos científicos, dissertações e teses (Marconi & Lakatos, 2017). Os levantamentos foram realizados nas bases de dados Google Acadêmico, SciELO e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD). Assim, como buscou-se selecionar e organizar as produções de determinado período com base na temática biomonitoramento da qualidade do ar, esta pesquisa também pode ser classificada como integrativa (Gil, 2022).

### **2.1 Critérios de elegibilidade da pesquisa**

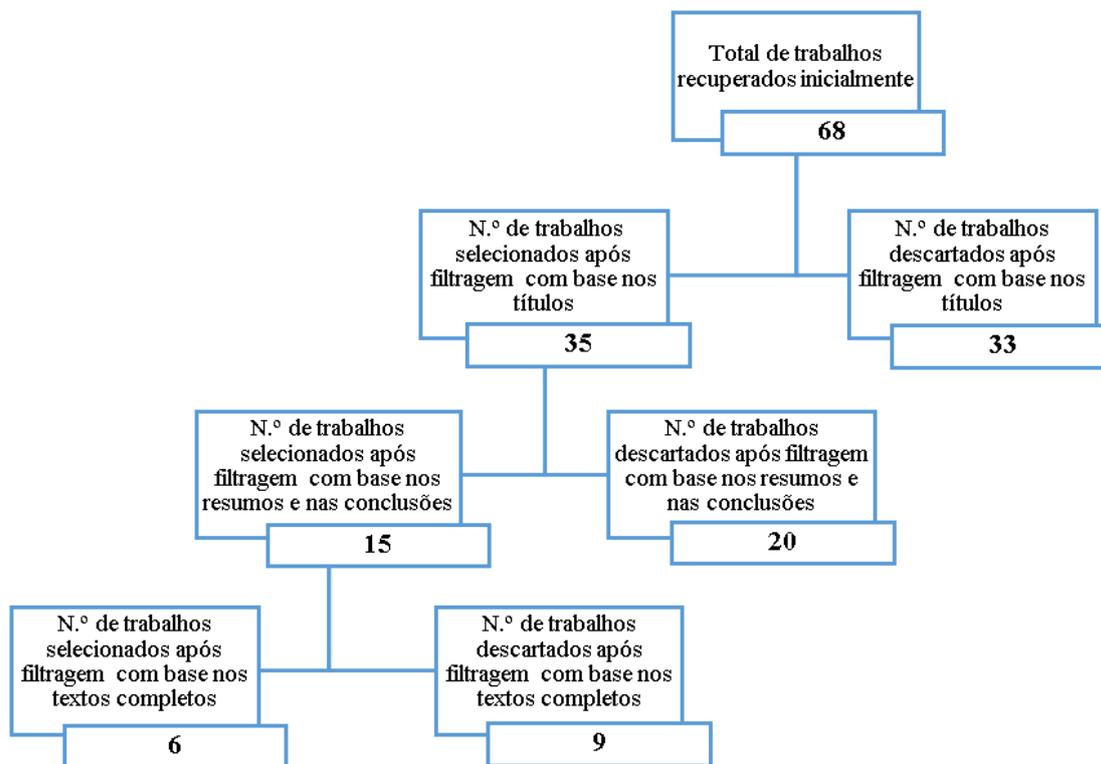
Foram realizados levantamentos na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, na Biblioteca Digital Google Acadêmico e no SciELO com os termos “biomonitoramento”, “biomonitor” e “bioindicador”. Definiu-se como critérios de inclusão artigos, trabalhos de conclusão de cursos (monografia, dissertação e tese) e capítulos de livros publicados nessas bases entre os anos de 2019 e 2022. Pelo fato deste estudo buscar conhecer a produção científica e os experimentos práticos no Brasil, excluiu-se estudos realizados em outros países.

A despeito dos termos “biomonitoramento”, “biomonitor” e “bioindicador” serem aplicáveis a muitas áreas, selecionou-se, inicialmente, todos os documentos que mencionaram esses termos nos seus títulos e/ou resumos. A pesquisa retornou 68 resultados, sendo, posteriormente, realizadas as etapas de exclusão e filtragem. Os trabalhos repetidos, comuns a mais de uma base de dados, foram contabilizados uma só vez.

Os procedimentos para filtragem dos trabalhos foram realizados em etapas. A primeira etapa para filtragem dos 68 trabalhos recuperados com os termos de pesquisa se deu por meio da leitura dos títulos, os trabalhos que não se encaixaram nos critérios da pesquisa foram descartados e os que se encaixaram, seguiram para a próxima etapa de filtragem. Essa segunda etapa se deu por meio da leitura dos resumos e das conclusões dos trabalhos. A última etapa de filtragem ocorreu por meio da leitura dos textos completos de cada trabalho (Figura 1). Assim, a exclusão foi baseada nos títulos, nos resumos e nas conclusões e, por último, nos textos completos, verificando os trabalhos que tratavam de forma efetiva do biomonitoramento da qualidade do ar, no Brasil.

Esse processo foi realizado por dois pesquisadores. Os estudos rejeitados por um destes foram excluídos da revisão. Foram descartados os estudos que não tiveram ênfase em biomonitoramento, os que tiveram baixa qualidade metodológica, assim como os que não foram realizados no Brasil.

**Figura 1** - Processo de filtragem dos trabalhos recuperados.



Fonte: Autores (2023).

## 2.2 Delineamento da Pesquisa

Após a análise dos trabalhos, foi selecionado um total de 6, os quais foram utilizados nos resultados do presente estudo. Além dos trabalhos selecionados, foram utilizados outros trabalhos como teses e dissertações para a elaboração da introdução e enriquecimento da discussão deste artigo. Como pode-se perceber, a pesquisa, que se trata de uma revisão integrativa, focou na identificação de trabalhos e de ferramentas utilizadas para o biomonitoramento da qualidade do ar, no Brasil. Para delineamento da pesquisa e alcance dos objetivos da revisão, construiu-se a Tabela 1, que contém indagações a serem respondidas.

**Tabela 1**- Questões de pesquisa.

Questões de pesquisa
1- Quais são as diferentes ferramentas/espécies e metodologias que têm sido utilizadas no biomonitoramento da poluição do ar?
2- As ferramentas/biomonitores conseguiram apresentar bons resultados para o monitoramento da qualidade do ar?
3- Quais os desafios apresentados para o uso do biomonitoramento da qualidade do ar?

Fonte: Autores (2023).

## 3. Resultados e Discussão

Após os levantamentos nas bases de dados, obteve-se 68 trabalhos, os quais passaram pela primeira etapa de filtragem baseada na leitura dos títulos. Após essa etapa, restaram 35 trabalhos que se mostraram adequados para este estudo. Assim, iniciou-se a segunda etapa de filtragem baseada na leitura dos resumos e conclusões, sobrando 15 após essa etapa. Na terceira

etapa de filtragem, foi realizada a leitura dinâmica dos textos completos, dos quais foram selecionados 6 que se mostraram adequados para este estudo.

Na Tabela 2 estão listados esses trabalhos selecionados. Os 2 primeiros são trabalhos de conclusão de curso de graduação na área de ciências biológicas; o terceiro trata-se de uma dissertação de mestrado no programa de pós-graduação em química; o quarto também é uma dissertação de mestrado, mas em um programa de pós-graduação em ciências do solo; já o quinto trata-se de uma dissertação de mestrado em um programa de pós-graduação em ciências, sendo a área de concentração em engenharia química; o último é um artigo científico publicado na Revista Brasileira de Meio Ambiente.

**Tabela 2** - Informações resumidas dos trabalhos selecionados.

<b>Autor(a)/ano</b>	<b>Título</b>	<b>Biomonitor/ Espécie(s)</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Cidade do estudo</b>
Victoriano, 2019. (Defesa em 2018).	Biomonitoramento do ar com Tradescantia Pallida (Rose) D.R. Hunt no município de Siderópolis, Santa Catarina.	Tradescantia Pallida (Rose) D.R. Hunt.	Avaliar o potencial mutagênico do ar utilizando o bioindicador Tradescantia pallida, através do teste de micronúcleo.	Siderópolis -SC.
Cardoso, 2019. (Defesa em 2018).	Biomonitoramento da qualidade do ar com Tradescantia pallida (Rose) D. R. Hunt, no município de Criciúma, Santa Catarina.	Tradescantia Pallida (Rose) D.R. Hunt.	Analisar a qualidade do ar em uma região da cidade de Criciúma, Santa Catarina, Brasil, verificando os efeitos mutagênicos no bioindicador.	Criciúma- SC.
Silva, 2019.	Avaliação da qualidade do ar na rodovia Rio- Petrópolis (BR-040), considerando os cenários de rotina e intervenções por obras.	Tillandsia usneoides e Tillandsia stricta	Realizar o monitoramento atmosférico usando filtros sintéticos e biomonitores para acompanhar variações nas concentrações de material particulado e na sua composição química na rodovia Rio-Petrópolis (BR-040), considerando a rotina e alterações causadas por obras na pista	BR-040-entre Petrópolis (RJ) e o Rio de Janeiro (RJ)
Lima, 2019.	Deposição atmosférica de metais pesados e avaliação de risco à saúde humana na cidade do Recife avaliados por musgos e exposição à poeira do asfalto.	Musgo	Biomonitorar a deposição atmosférica de metais pesados pelo uso de musgos e avaliar os teores totais e bioacessíveis nas poeiras de asfalto coletadas em vias da cidade do Recife com diferentes fluxos veiculares.	Recife-PE.
Campos, 2020.	Biomonitoramento da contaminação atmosférica por metais e HPAs em torno do Complexo Industrial de Cubatão utilizando Psidium guajava “Paluma”.	Psidium guajava “Paluma”.	Indicar áreas de risco associadas a metais e HPAs (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos) para a saúde da população residente no município de Cubatão, assim como possíveis fontes de emissão destes, por meio do biomonitoramento	São Paulo- SP.
Jardim, Cardoso e Jesus, 2021.	Caracterização e utilização de três espécies da arborização urbana no biomonitoramento de material particulado	Azadirachta; Caesalpinia peltophoroides; Licania tomentosa	Caracterizar e avaliar a concentração de material particulado na área de estudo.	Araçuaí- MG.

Fonte: Autores (2023), com base nos dados da pesquisa.

Os autores dos trabalhos descritos na Tabela 2 apresentam, inicialmente, algumas considerações a respeito do biomonitoramento. Victoriano (2019), por exemplo, lembra que estudos anteriores já demonstraram a relação entre o nível de poluição proveniente do tráfego veicular e o aumento no número de micronúcleos e, conseqüentemente, a incidência de alterações anatômicas nas folhas de *Tradescantia Pallida*. Essa autora, assim como Cardoso (2019), empregou como amostras biomonitoradas sensíveis, diferentemente dos demais autores dos trabalhos selecionados, que empregaram biomonitoradores acumuladores.

Os biomonitoradores são considerados: (i) sensíveis quando reagem aos estresses provocados pelo meio na forma de alterações nas suas características fisiológicas, morfológicas ou genética, e (ii) acumuladores quando reagem acumulando substâncias do meio externo nos seus tecidos. Nesse último caso, eles podem ser utilizados para determinação das concentrações das substâncias acumuladas, utilizando-se equipamentos e técnicas complementares (Gerdol et al., 2014).

### 3.1 Biomonitoramento: aspectos conceituais e métodos

Tecendo ainda discussões sobre os trabalhos selecionados, no trabalho de Jardim et al. (2021), o biomonitoramento é apresentado como sendo “um conjunto de técnicas que se utilizam de organismos vivos para apontar e monitorar possíveis alterações ambientais oriundas de fontes poluidoras”. Nesse mesmo sentido, os trabalhos de Lima (2019), Silva (2019) e Campos (2020) consideram o biomonitoramento como um processo que emprega organismos para a verificação e avaliação das condições ambientais, sendo considerado mais econômico, quando comparado aos métodos convencionais.

Isso porque alguns organismos reagem produzindo respostas, quando expostos a ambientes que apresentam poluentes, assim, podem ser denominados biomonitoradores ou bioindicadores (Cardoso, 2019). Quando são utilizadas espécies endêmicas para análise de determinado ambiente, dizemos que se trata de biomonitoramento passivo, mas quando há o transplante de espécies de um local considerado não poluído para outro que se quer monitorar sob condições controladas, trata-se de monitoramento ativo (Bargagli, 2016).

Os Equipamentos de base utilizados para os procedimentos analíticos nos biomonitoradores dos trabalhos encontrados estão resumidos na Tabela 3.

**Tabela 3** - Métodos/Equipamentos utilizados nos estudos dos trabalhos selecionados.

Autor(a)	Método/Equipamento empregado no estudo
Victoriano, 2019. (Defesa em 2018).	Observação de efeitos mutagênicos por meio de microscópio com aumento de 400x, após os procedimentos químicos necessários.
Cardoso, 2019. (Defesa em 2018).	Observação de efeitos mutagênicos nos vegetais por meio de microscópio com aumento de 400x, após os procedimentos químicos necessários.
Silva, 2019.	Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS - Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) e Cromatografia Iônica (CI) para caracterização química das PTS. Para quantificar Peróxido de Hidrogênio, Metalotioneína e Glutathione Reduzida utilizou-se o leitor de microplaca. Já para quantificar as proteínas totais nas células dos vegetais, utilizou-se a Espectrofotometria.
Lima, 2019.	Espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado, ICP-OES Perkin Elmer 7000 DV.
Campos, 2020.	Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) para análise dos metais presentes nas amostras vegetais.
Jardim, Cardoso e Jesus, 2021.	Análise gravimétrica por meio da pesagem do material particulado presente nas amostras vegetais, após os procedimentos químicos necessários.

Fonte: Autores (2023), com base nos dados da pesquisa.

### 3.2 Procedimentos analíticos utilizados nos biomonitores

Conforme já descrito na Tabela 2 e Tabela 3, tanto Victoriano (2019) quanto Cardoso (2019) trabalharam com o biomonitor *Tradescantia Pallida (Rose) D.R. Hunt*, utilizando para a análise a observação dos efeitos mutagênicos das amostras. Para isso, ambos realizaram um procedimento químico preliminar com a imersão das amostras em solução fixadora de ácido acético durante 24 horas e, em seguida, colocaram elas em álcool 70%. Após mais alguns procedimentos complementares, as leituras ocorreram por meio de microscópio com aumento de 400x. Assim, foi realizada a contagem das células em fase tétrade e dos micronúcleos, quando presentes.

Por sua vez, Silva (2019) e Campos (2020) empregaram para a análise de metais nas amostras (vegetais com acúmulo de agentes poluidores) a Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), que é uma técnica universal apropriada para separar espécies iônicas de acordo com a relação massa/carga (m/z). Essa técnica permite a análise de amostras nas fases sólida, líquida e gasosa. Por conta de sua versatilidade e seus baixos limites de detecção ela vem sendo bastante utilizada, permitindo quantificar individualmente diversos isótopos de um grande intervalo de elementos (Silva, 2019).

Além dessa técnica, os dois autores utilizaram outra em comum, a cromatografia. Campos (2020), por exemplo, utilizou essa técnica para analisar a presença de HPAs (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos), enquanto Silva (2019) utilizou a Cromatografia para detecção de metaloproteínas.

A primeira técnica consiste na separação dos componentes de uma amostra fazendo sua distribuição em duas fases: fase móvel (líquido ou gás) e fase estacionária (um sólido ou gel inerte) considerando as interações de cada um deles com uma matriz inerte. Adicionalmente, Silva (2019) utilizou a espectrofotometria, que se baseia no princípio de que materiais transparentes absorvem parte da luz incidente sobre eles e outra parte que não é absorvida é transmitida (Silva, 2019). A medição dessa luz transmitida pelo espectrofotômetro (transmitância) é descontada da intensidade da luz (fótons) que foi incidida, resultando no total ou intensidade de luz que o material absorveu (absorbância).

Em vez da espectrometria de emissão de massas com plasma acoplado, que foi utilizada por Silva (2019) e por Campos (2020), Lima (2019) utilizou a espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) para determinar os teores de Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr, V e Zn. É importante destacar que para a escolha do espectrômetro (ICP-MS ou ICP-OES) mais adequado, alguns fatores devem ser considerados como, por exemplo, o tipo da amostra e dos elementos a serem analisados, o limite de detecção desejado, os custos entre outros.

Há distinção também na forma de funcionamento desses equipamentos. O ICP-OES, por exemplo, utiliza uma fonte de plasma muito quente para excitar os átomos de tal modo que eles emitam fótons com comprimentos de ondas característicos para cada elemento químico. O quantitativo de fótons emitidos é diretamente proporcional à concentração do elemento presente na amostra. Apesar do ICP-MS também utilizar uma fonte de plasma, essa fonte não serve para produzir fótons, mas para produzir íons dos traços de metais. Assim, os íons produzidos nesse plasma são separados e transportados com base na razão massa/carga. A produção de muitos íons positivos possibilita que o ICP-MS alcance limites de detecção em nível de parte por trilhão (Barbour, 2011).

Mais recentemente, Jardim et al. (2021) utilizaram como método analítico em seu estudo a pesagem do material particulado presentes nas amostras. Essa pesagem foi realizada após o material particulado presente nos vegetais ter sido diluído em água destilada e, em seguida, filtrado em um filtro que, previamente, passara por um dessecador. Após filtrar o material diluído, o filtro foi colocado novamente no dessecador para realizar a diferença de pesagem e, assim, encontrar a massa do material particulado.

### 3.3 Resultados relativos aos biomonitores

Victoriano (2019) aponta que o bioindicador vegetal *Tradescantia Pallida* apresentou ótima eficácia para a percepção de poluentes atmosféricos. Ele chama a atenção para a interferência das condições climáticas, que fizeram a quantidade de micronúcleos (MCNs) variar, quando levadas em conta as diferentes estações do ano, onde foram realizadas as coletas.

Percebeu-se, por exemplo, que durante o período de janeiro a agosto de 2018 houve uma menor quantidade de micronúcleos, quando comparado ao período de junho a agosto do mesmo ano. Isso leva a crer que “fatores climáticos como de precipitação com a ocorrência de chuva leve e a velocidade máxima do vento contribuíram para aumento da frequência de micronúcleos” (Victoriano, 2019).

No mesmo sentido, Cardoso (2019) concluiu que o bioindicador *Tradescantia Pallida* se mostrou muito eficiente para realização do biomonitoramento de qualidade do ar. A autora acrescenta que o teste possui baixos custos e a planta é de fácil cultivo e adaptação. Ressalta que as amostras do mês de maio de 2018 apresentaram mais MCNs, o que pode estar relacionado com os índices de precipitação. Assim, é importante a realização de estudo abrangendo um maior período de amostragem para correlacionar as variáveis e entender em qual período do ano há mais poluentes na atmosfera.

Portanto, Victoriano (2019) e Cardoso (2019) convergem no sentido de que fatores meteorológicos como temperatura, velocidade do vento, umidade relativa do ar e precipitação influenciam na frequência de micronúcleos, já que esses fatores podem dispersar os poluentes de forma que não cheguem a ser fixados nos biomonitores.

Por conseguinte, Silva (2019) constatou que houve maior enriquecimento de metais para as amostras de *T. stricta*. O fato pode ser atribuído ao local de origem dessas plantas, que é considerado rural, e, portanto, apresenta menos fontes de emissões antropogênicas em comparação com o jardim botânico, local de origem das *T. usneoides*. Suspeita-se também que a fisiologia deste último vegetal é mais propícia ao acúmulo. Além disso, uma análise prévia de biomarcadores de estresse oxidativo apontou correlações entre metalotioneína e Mn, Fe, Co, Ni, Cu e Zn, evidenciando concentrações maiores que as fisiológicas para esses elementos químicos (Silva, 2019).

Por outro lado, a autora ainda entende ser possível que as *T. usneoides* já apresentassem elevadas concentrações de elementos metálicos e já estivessem atingindo um processo de destoxificação, o que contribuiu para que apresentassem menor enriquecimento de metais. Foi verificado, ainda, que as duas formas utilizadas no estudo (filtros sintéticos e biomonitores) confirmaram a presença de Cd, Cu e Ni, elementos que são comumente provenientes de atividades antropogênicas. Essa constatação sugere que o emprego de biomonitores se mostrou adequado para avaliação da qualidade do ar na área da BR- 040, pois possibilitou a realização de inferências acerca de determinados elementos presentes no ar.

Passando para a análise do trabalho de Lima (2019), que empregou musgos como biomonitores, percebeu-se que o autor identificou que teores medianos de alguns metais presentes nesses vegetais tiveram a seguinte ordem decrescente (em mg kg<sup>-1</sup>): Fe (3964,4) > Zn (80,9) > Ba (78,4) > Mn (57,8) > Sr (36,6) > Cu (21,9) > Cr (9,8) > Pb (9,5) > V (8,2) > Ni (3,5) > Sb (0,9) > Cd (0,3). Nesse trabalho, ele conseguiu demonstrar que teores apresentaram amplitudes de até 79 vezes, além de altos coeficientes de variação (35% a 87 %) o que pode indicar que as diferentes características das vias, onde os musgos foram expostos, podem ter impactado os dados. Lima (2019) comparou, ainda, os teores encontrados com os de alguns estudos realizados em outros países e em áreas da Europa consideradas limpas. Com isso, identificou que, com exceção do Mn e do Pb, os teores encontrados para a cidade de Recife foram consideravelmente maiores do que os das áreas consideradas como de referência (Noruega e Macedônia).

Os teores relativamente altos identificados nas vias do Recife, para o autor (2019), podem estar relacionados à proximidade com uma das fontes de tráfego. Ele conclui também que as diferenças fisiológicas entre as espécies vegetais podem provocar maior ou menor acúmulo de metais. Contudo, Lima (2019) sugere que as limitações não diminuem a

importância do biomonitoramento da poluição atmosférica por metais com a utilização de musgos, pois essa técnica ainda é promissora e econômica para a gestão ambiental, necessitando apenas de aperfeiçoamentos.

Dando sequência com o estudo de Campos (2020), que como Silva (2019) utilizaram a técnica de espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente e a técnica de cromatografia, a autora alcançou resultados detalhados, identificando e quantificando elementos químicos metálicos, além da identificação de HPAs por regiões em que os biomonitoradores foram expostos.

Campos (2020) concluiu que, com o auxílio do biomonitoramento, foi possível identificar que na Região Periférica-Industrial da área de estudo houve maior influência de Cr e Ni e que “na região industrial houve predominância de HPAs mais leves, considerados petrogênicos, na região central e periférica houve contribuição maior de HPAs mais pesados, pirogênicos” (Campos, 2020).

Por fim, ressaltando as contribuições de Jardim et al. (2021), os quais utilizaram as espécies *Azadirachta*; *Caesalpinia peltophoroides*, *Licania tomentosa*, os autores apontam que essas duas últimas espécies, que estão presentes na área urbana de Araçuaí-MG, podem ser utilizadas como biomonitoradores passivos e de acumulação. Enfatizam que a *Licania Tomentosa* obteve a maior capacidade de retenção de material particulado e a *Azadirachta* a menor. Isso se explica devido às diferenças morfológicas das folhas das espécies. Assim, os autores indicam a espécie *Caesalpinia Peltophoroides* para realizar o biomonitoramento entre zonas com atividades antrópicas, enquanto indicam a espécie *Licania Tomentosa* para zonas sem pavimentação.

### 3.4 Viabilidade e Desafios

Com esses achados, percebe-se ser viável, dependendo dos objetivos e da metodologia, a utilização de biomonitoradores para o monitoramento da qualidade do ar; principalmente, pelo fato de que os monitores mecânicos apresentam alto custo para cobrir grandes áreas e necessitam de infraestrutura adequada (energia elétrica, segurança, acesso). Assim, o uso de biomonitoradores complementa o estudo de áreas poluídas realizados com os monitores mecânicos e estações fixas de monitoramento.

Apesar do baixo custo das técnicas que utilizam o biomonitoramento, algumas limitações podem ser apontadas dependendo da precisão que se quer obter. Como foi percebido pelos autores dos trabalhos analisados, os fatores meteorológicos influenciam no processo do biomonitoramento, assim como acontece também com outros equipamentos que funcionam por meio de sensores. Cabe ressaltar, ainda, que o uso de biomonitoradores não substitui totalmente a avaliação de concentração de poluentes realizada por procedimentos físico-químicos, mas tem a função de fornecer informações complementares.

Ainda assim, é importante ter em mente que o uso de diferentes espécies ou cultivares, seus diferentes estágios e suas condições de desenvolvimento podem fornecer medidas diferentes para os monitoramentos realizados, devido as fisiologias dos vegetais. Portanto, os efeitos observados em determinado organismo não devem ser transferidos automaticamente para outros ou para o ecossistema.

## 4. Considerações Finais

Concluindo a presente revisão integrativa em relação à abordagem da literatura sobre o biomonitoramento da qualidade do ar, bem como as ferramentas e procedimentos que estão sendo utilizados, percebeu-se que os trabalhos são escassos para o período considerado. Verificou-se que metade dos trabalhos encontrados estão preocupados em análises para constatar se há ou não poluição por agentes poluidores nos locais monitorados. São os casos, por exemplo, dos dois trabalhos

que utilizaram a observação dos efeitos mutagênicos das amostras e o que utilizou a pesagem do material particulado presentes nas amostras. Por esses mecanismos não se consegue identificar os agentes e/ou elementos químicos dispersos na região monitorada.

Os trabalhos de Lima (2019), Silva (2019) e Campos (2020), que utilizaram a espectrometria para análise dos biomonitores, fornecem contribuição mais abrangente ao indicar os metais presentes nas áreas monitoradas e os riscos à saúde da população residente no seu entorno. As técnicas mais avançadas com o emprego da espectrometria de emissão atômica e de cromatografia líquida acoplada ao detector de arranjo de diodos possibilitou a quantificação de metais como As, Cd, B, Cr, Ni, Mn, Pb, Zn, além da identificação de outros agentes poluentes presentes nas amostras.

Apesar do biomonitoramento ser uma técnica bastante utilizada pelo seu baixo custo e simplicidade em alguns casos, ela encontra limitações em decorrência de alguns fatores como os meteorológicos e os relativos à fisiologia e anatomia dos vegetais.

Acredita-se ser necessária a realização de novas pesquisas de campo que contribuam com o estado arte e que tragam novas metodologias de análise mais aprofundadas e confiáveis capazes de correlacionar evidências científicas sobre os dados dos poluentes identificados por meio do biomonitoramento com os identificados com equipamentos normatizados/validados. Tem-se como outra oportunidade de pesquisa interdisciplinar correlacionar as doenças respiratórias de determinada região com os agentes poluidores identificados com o auxílio dos biomonitores.

## Referências

- Barbour, R. (2011). *Determinação de impurezas em cobre eletrolítico por espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado*. Tese (Programa de Pós-Graduação em Química) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia.
- Bargagli, R. (2016). Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: A review. *Science of the Total Environment*, 572, 216-231.
- Campos, R. D. O. A. (2020). *Biomonitoramento da contaminação atmosférica por metais e HPAs em torno do complexo industrial de cubatão utilizando psidium guajava paluma*. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência) - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cardoso, T. C. (2019). *Biomonitoramento da qualidade do ar com tradescantia pallida (rose) dr hunt, no Município de Criciúma, Santa Catarina*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Santa Catarina.
- Dapper, S. N., Spohr, C., & Zanini, R. R. (2016). Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, 30, 83-97.
- Dhaouadi, S., Khalloufi, N., Ayati, K., Ayeb, N., & Béjaoui, M. (2022). Use of lichen species for air pollution biomonitoring: Case of Dar-Chichou forest (Cap-Bon, North-East Tunisia). *Environmental and Sustainability Indicators*, 16, 100211.
- Ellenberg, H. (1991) Bioindicators and biological monitoring. In: *Biological monitoring: signals from the environment*. (Eds. H. Ellenberg, U. Arndt, R. Bretthauer, B. Ruthsatz, L. Steubing). 13-74. (Vieweg: Braunschweig, Germany).
- Gerdol, R., Marchesini, R., Iacumin, P., & Brancaleoni, L. (2014). Monitoring temporal trends of air pollution in an urban area using mosses and lichens as biomonitors. *Chemosphere*, 108, 388-395.
- Gil, AC (2022). *Como elaborar projetos de pesquisa*. (7a ed.) Editora Atlas.
- Guarino, F., Improta, G., Triassi, M., Castiglione, S., & Ciatelli, A. (2021). Air quality biomonitoring through *Olea europaea* L.: The study case of "Land of pyres". *Chemosphere*, 282, 131052.
- Haverić, A., Četković, T., Hasanović, M., Pourrut, B., Klačar, L. Č., Omanović, M. H., ... & Haverić, S. (2022). P07-34 Wild privet (*Ligustrum vulgare* L.)—a reliable plant model for the air-pollution biomonitoring. *Toxicology Letters*, 368, S132.
- Jardim, W. S., Cardoso, K. M., & de Jesus, C. P. (2021). Caracterização e utilização de espécies da arborização urbana no biomonitoramento de material particulado. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 9(2). 26-32.
- Karmakar, D., Deb, K., & Padhy, P. K. (2021). Ecophysiological responses of tree species due to air pollution for biomonitoring of environmental health in urban area. *Urban Climate*, 35, 100741.
- Klumpp, A., Klumpp, G., Ansel, W., & Fomin, A. (2002). European network for the assessment of air quality by the use of bioindicator plants—the first year of EuroBionet. In book: *Bioindication and Air Quality in European Cities – Research, Application, Communication* (pp.37-55)

Kousehlar, M., & Widom, E. (2020). Identifying the sources of air pollution in an urban-industrial setting by lichen biomonitoring-A multi-tracer approach. *Applied Geochemistry*, 121, 104695.

Lima, L. H. V. (2019). *Deposição atmosférica de metais pesados e avaliação de risco à saúde humana na cidade do Recife avaliados por musgos e exposição à poeira do asfalto*. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

Lucadamo, L., Gallo, L., & Corapi, A. (2022). Detection of air quality improvement within a suburban district (southern Italy) by means of lichen biomonitoring. *Atmospheric Pollution Research*, 13(3), 101346.

Marconi, M.A. & Lakatos, E.M. (2017). *Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesperguntas, amostragens e técnicascaso de pesquisa, elaboração, análisae interpretação de dados*. (8ª ed.). Editora Atlas.

Santos, R. K. dos, Gomes, N. C., Oliveira, G. de A., Silva, J. J. R., Alvarenga, C. A., & Belardi, R.-M. (2018). Liquens utilizados como bioindicadores da qualidade do ar do município minerador de Itabira. *Research, Society and Development*, 7(12), e4712480.

Silva, K. B. O. (2019). *Avaliação da qualidade do ar na Rodovia Rio-Petrópolis (BR-040), considerando os cenários de rotina e intervenções por obras*. Dissertação (Mestrado em Química) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Victoriano, S. N. (2019). *Biomonitoramento do ar com Tradescantia pallida (Rose) DR Hunt no Município de Siderópolis, Santa Catarina*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Santa Catarina.