

## *Ilex paraguariensis* (erva-mate) como bioindicadora da qualidade do ar e de possíveis fontes de emissão de poluentes em Catanduvas (Santa Catarina)

Beatriz Chinato Begnini Casagrande<sup>1</sup>, Eduardo Karnopp<sup>2</sup>, João Carlos Ferreira de Melo Júnior<sup>3</sup>, Lenita Agostinetto<sup>4</sup>, Mariane Bonatti Chaves<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Mestre em Sistemas Produtivos, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Sistemas Produtivos, Universidade do Contestado (UNC), Brasil.

<sup>2</sup>Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Brasil.

<sup>3</sup>Doutor em Ecologia e Conservação, Programa de Pós-graduação em Saúde e Meio Ambiente, Programa de Pós-graduação em Patrimônio Cultural e Sociedade, Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Brasil.

<sup>4</sup>Doutora em Produção Vegetal, Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Ambiente e Saúde, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Sistemas Produtivos, na Universidade do Planalto Catarinense (UNIPLAC), Brasil.

<sup>5</sup>Doutora em Engenharia Química, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Gestão de Processos Sustentáveis, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Sistemas Produtivos, Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Brasil. (\*Autor correspondente: mariane.bonatti@univille.br)

Histórico do Artigo: Submetido em: 15/12/2025 – Revisado em: 26/12/2025 – Aceito em: 21/01/2026

### RESUMO

O município de Catanduvas, localizado no oeste de Santa Catarina, destaca-se por seu recente crescimento econômico nos setores madeireiro, de produção de erva-mate, rações, transporte e agricultura, atividades potencialmente emissoras de poluentes atmosféricos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade da espécie *Ilex paraguariensis* (erva-mate) como bioindicadora da qualidade do ar. Foram selecionadas três áreas de amostragem localizadas em diferentes zoneamentos do município de Catanduvas: área 1 – Macrozona Rural, área 2 – Zona de Corredor Comercial e área 3 – Zona Comercial Predominante. As análises físico-químicas demonstraram concentrações de material particulado foliar entre 0,127 e 0,172 mg/cm<sup>2</sup>, valores comparáveis aos registrados em cidades maiores, como Joinville, Jaraguá do Sul e Goiânia. Na composição iônica, destacaram-se os íons nitrato, sulfato e cloreto, associados a fontes como tráfego veicular, combustão de combustíveis fósseis, atividades industriais e queima de resíduos. As análises botânicas indicaram que as áreas 1 e 3 apresentaram maiores indícios de impacto ambiental, evidenciado pela redução da massa fresca e seca foliar e teor de água, além do aumento da área foliar específica, características que sugerem uma resposta adaptativa da planta ao estresse gerado pela poluição atmosférica. Os resultados comprovam a eficiência da *Ilex paraguariensis* como bioindicadora, permitindo gerar informações relevantes sobre a qualidade do ar de forma prática e de baixo custo, contribuindo para o monitoramento ambiental, a formulação de políticas públicas e ações de conscientização ambiental em comunidades de pequeno porte, alinhando-se às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável voltadas à proteção do meio ambiente e promoção da sustentabilidade local.

**Palavras-Chaves:** Poluição atmosférica, Bioindicador, *Ilex paraguariensis*, Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

## *Ilex paraguariensis* (erva-mate) as a bioindicator of air quality and possible sources of pollutant emissions in Catanduvas (Santa Catarina)

### ABSTRACT

The municipality of Catanduvas, located in the western region of Santa Catarina, stands out for its recent economic growth in the timber, yerba mate production, animal feed, transportation, and agriculture sectors — activities that are potentially sources of atmospheric pollutants. This study aimed to evaluate the applicability of the species *Ilex paraguariensis* (yerba mate) as a bioindicator of air quality. Three sampling areas located in different zoning regions of the municipality of Catanduvas were selected: Area 1 – Rural Macrozone, Area 2 – Commercial Corridor Zone, and Area 3 – Predominantly Commercial Zone. The physicochemical analyses showed foliar particulate matter concentrations ranging from 0.127 to 0.172 mg/cm<sup>2</sup>, values comparable to those recorded in larger cities such as Joinville, Jaraguá do Sul, and Goiânia. In the ionic composition, nitrate, sulfate, and chloride ions were prominent, associated with sources such as vehicular traffic, fossil fuel combustion, industrial activities, and waste burning. The botanical analyses indicated that Areas 1 and 3 showed higher signs of environmental impact, evidenced by reductions in fresh and dry leaf mass and

water content, as well as an increase in specific leaf area — characteristics suggesting an adaptive plant response to stress caused by air pollution. The results demonstrate the efficiency of *Ilex paraguariensis* as a bioindicator, providing relevant information on air quality in a practical and low-cost way, contributing to environmental monitoring, public policy formulation, and environmental awareness actions in small communities, aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs) aimed at environmental protection and the promotion of local sustainability.

**Keywords:** Air pollution, Bioindicator, *Ilex paraguariensis*, Sustainable Development Goals (SDG).

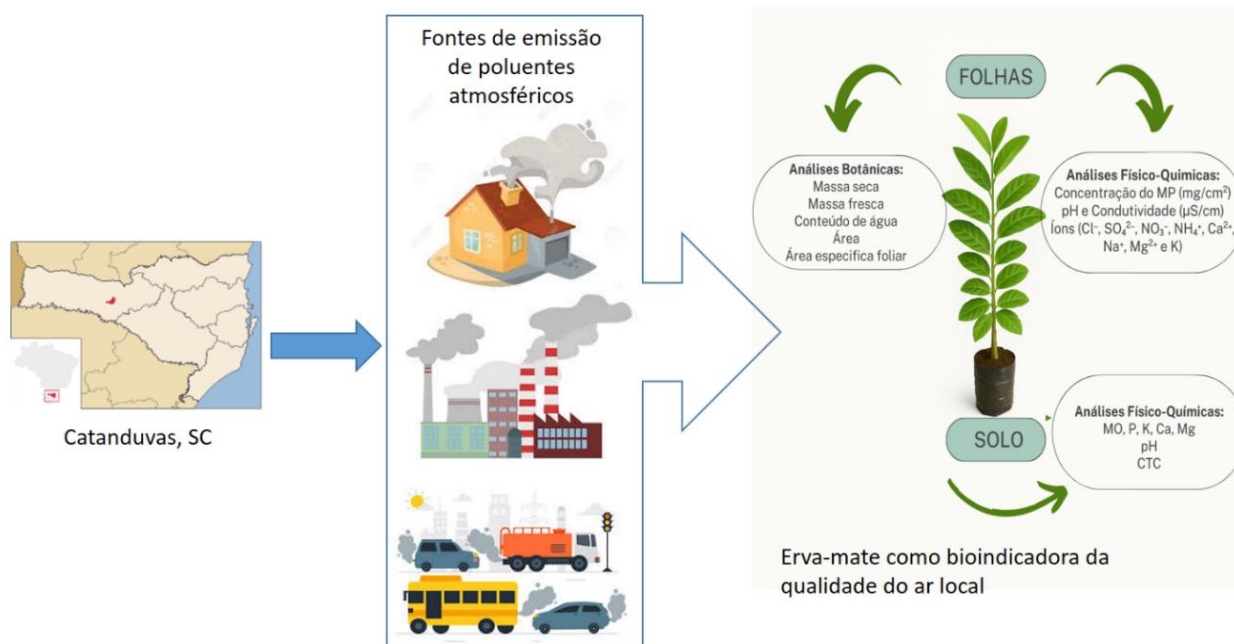
## *Ilex paraguariensis* (yerba mate) como bioindicadora de la calidad del aire y de posibles fuentes de emisión de contaminantes en Catanduvas (Santa Catarina)

### RESUMEN

El municipio de Catanduvas, ubicado en el oeste del estado de Santa Catarina, se distingue por su reciente crecimiento económico en los sectores maderero, de producción de yerba mate, alimentos, transporte y agricultura, actividades que pueden generar emisiones contaminantes. Sin embargo, no existen datos previos sobre la calidad del aire en la región. El objetivo de este trabajo fue evaluar la aplicabilidad de la especie *Ilex paraguariensis* (yerba mate) como bioindicador de la calidad del aire mediante el uso de análisis químicos y botánicos como método de monitoreo indirecto, económico y viable para municipios pequeños, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de la ONU, especialmente los relacionados con la salud ambiental y las ciudades sostenibles. Para ello, se seleccionaron tres áreas de muestreo ubicadas en diferentes zonas del municipio de Catanduvas: área 1 — Rural Macrozona—, área 2 —Zona de Corredor Comercial— y área 3 —Zona Comercial Predominante—. Los análisis fisicoquímicos revelaron concentraciones de material particulado foliar entre 0,127 y 0,172 mg/cm<sup>2</sup>, valores similares a los registrados en ciudades más grandes como Joinville, Jaraguá do Sul y Goiânia. En cuanto a la composición iónica, destacaron los iones nitrato, sulfato y cloruro, asociados a fuentes como el tráfico rodado, la combustión de combustibles fósiles, las actividades industriales y la quema de residuos. Los análisis botánicos indicaron que las áreas 1 y 3 presentaron mayores indicios de impacto ambiental, evidenciados por la reducción de la masa fresca y seca foliar y del contenido de agua, así como por el aumento del área foliar específica. Estas características sugieren una respuesta adaptativa de la planta al estrés generado por la contaminación atmosférica. Estos resultados demuestran la eficacia de *Ilex paraguariensis* como bioindicador, ya que permite obtener información relevante sobre la calidad del aire de forma práctica y económica, contribuyendo así al monitoreo ambiental.

**Palabras clave:** Contaminación atmosférica, Bioindicadores, *Ilex paraguariensis*, Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

### RESUMO GRÁFICO // GRAPHICAL ABSCTRACT



## 1. Introdução

A Resolução CONAMA nº 506/2024 define como poluente atmosférico “qualquer forma de matéria que, por sua quantidade, concentração, tempo ou outras características, torne ou possa tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso da propriedade e às atividades da comunidade”. Esses poluentes podem ter origem em fontes antrópicas, como atividades urbanas e industriais ou em fontes naturais, como poeira e erupções vulcânicas.

A poluição atmosférica está associada a doenças respiratórias e cardiovasculares, além de aumentar o risco de abortos espontâneos, mortalidade infantil e câncer de pulmão (Arriazu-Ramos et al., 2025; Karimi et al., 2024; Perry, 2025). Estima-se que cause entre 6,7 e 8,1 milhões de mortes prematuras anuais no mundo, sendo o material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) o principal responsável, com cerca de 4,1 a 4,2 milhões de óbitos. O ozônio troposférico (O<sub>3</sub>) contribui com aproximadamente 365 mil mortes, enquanto o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) está associado a até 1,7 milhão de mortes por ano. Esses poluentes, majoritariamente provenientes da queima de combustíveis fósseis, configuram a poluição do ar como uma das maiores ameaças ambientais à saúde humana (G. S. dos Santos et al., 2019; J. M. Santos et al., 2022; Schaidhauer et al., 2024; World Health Organization, 2024).

Além dos impactos diretos à saúde, a poluição do ar gera consequências sociais e econômicas, como aumento dos custos com saúde pública, redução da produtividade laboral e escolar e queda da produtividade agrícola, já que a vegetação também sofre os efeitos da deposição de poluentes. Comunidades vulneráveis são ainda mais afetadas, tanto pela exposição mais intensa à má qualidade do ar quanto pela suscetibilidade a eventos climáticos extremos, ampliando desigualdades sociais (Alves e Feliciano, 2022; Lima et al., 2020).

Do ponto de vista ambiental, a poluição do ar contribui para a degradação da qualidade do ar, perda de biodiversidade, chuvas ácidas, crise climática e aquecimento global. O aumento de CO<sub>2</sub> está diretamente relacionado às mudanças climáticas, enquanto o material particulado altera solos, água e vegetação, reduzindo a fotossíntese e a produtividade das plantas. Assim, torna-se evidente a urgência de estratégias integradas de controle das emissões e monitoramento da qualidade do ar, visando proteger o meio ambiente e a saúde humana (Sorana & Silva, 2024).

Apesar disso, o monitoramento da qualidade do ar no Brasil ainda é limitado, abrangendo poucos municípios e concentrando-se principalmente em grandes centros urbanos como São Paulo e Rio de Janeiro. Além de restrito, trata-se de um procedimento custoso, que demanda investimentos elevados e pessoal especializado (Seibert et al., 2022). Nesse contexto, o biomonitoramento utilizando plantas surge como alternativa de menor custo e eficiente para detectar a presença e intensidade de poluentes atmosféricos.

Plantas bioindicadoras podem refletir o estado do ambiente e responder à poluição por meio de alterações morfológicas ou pela capacidade de acumular poluentes nos tecidos (Cardoso et al., 2017; Cavallaro et al., 2019). Entre 2019 e 2024, foram identificadas 52 espécies vegetais usadas como bioindicadoras, sobretudo pela análise foliar devido à capacidade das folhas de acumular material particulado e metais traço (Sobrinho et al., 2025). A erva-mate (*Ilex paraguariensis*), com folhas coriáceas e perenes, é uma espécie promissora para esse uso e ocorre amplamente no município de Catanduvas.

Catanduvas, localizado no oeste de Santa Catarina, é um município de pequeno porte, com cerca de 10 mil habitantes, mas que vem apresentando crescente desenvolvimento nos setores madeireiro, de produção de erva-mate, rações, transporte e agricultura (Catanduvas, 2024). Essas atividades podem contribuir para emissões atmosféricas, mas não há informações disponíveis sobre a qualidade do ar no município, reforçando a importância de estudos locais.

A literatura evidencia a eficácia do biomonitoramento passivo. Em Joinville/SC, dos Santos et al. (2019) e Cavallaro et al. (2019) registraram maior acúmulo de material particulado e redução de atributos foliares em áreas urbanas/industriais. Resultados semelhantes foram observados em Goiânia por Reis (2014), bem como

por Cardoso et al. (2017) em regiões de tráfego intenso. Estudos internacionais, como os de Xu et al. (2019) em Pequim e Freer-Smith et al. (2005) em Londres, também encontraram concentrações significativas de material particulado foliar. Pesquisas recentes ampliam esse panorama Bonatti-Chaves et al. (2024) e Schaidhauer et al. (2024) identificaram impactos ambientais e efeitos simultâneos na saúde humana; Baesso Moura et al. (2024), na Itália, relacionaram características foliares à deposição de material particulado; e Popek et al. (2025), na Polônia, demonstraram a eficácia de barreiras vegetais na redução de material particulado e elementos traço. Esses achados reforçam a importância do uso de plantas como ferramentas eficientes na mitigação da poluição atmosférica.

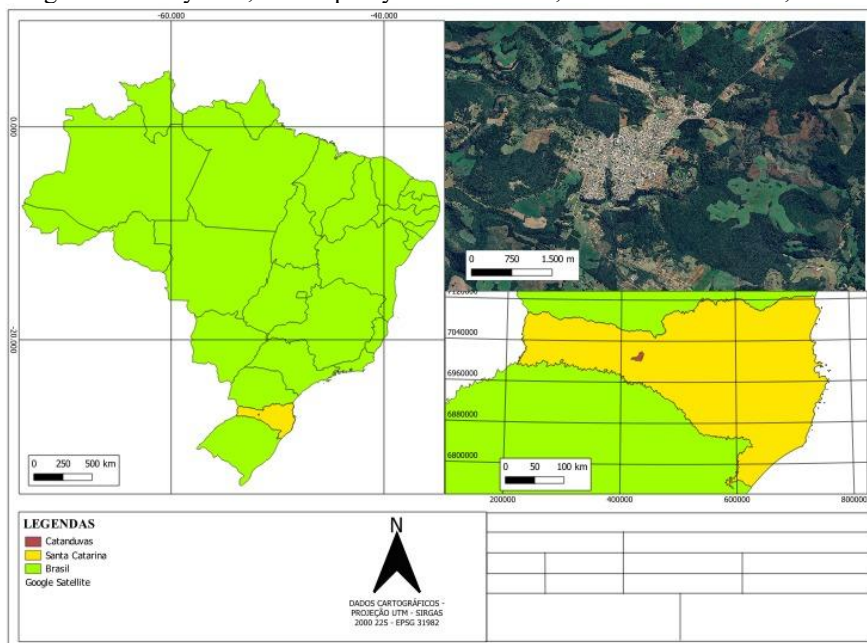
Considerando que a qualidade do ar está diretamente relacionada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 3, 11 e 13, torna-se essencial promover ações que conciliem desenvolvimento econômico, proteção ambiental e mitigação das mudanças climáticas. Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade do ar no município de Catanduvas e identificar possíveis fontes de emissão de poluentes por meio do biomonitoramento passivo utilizando *Ilex paraguariensis* (erva-mate).

## 2. Material e Métodos

### 2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido no município de Catanduvas, localizado na região Oeste do estado de Santa Catarina, Brasil nas coordenadas geográficas 27°04'14" de latitude sul e 51°39'42" de longitude oeste (Figura 1). Segundo o Censo Demográfico de 2022, o município apresenta população de 10.566 habitantes, área territorial de 199,166 km<sup>2</sup> e densidade demográfica de 53,06 habitantes km<sup>-2</sup>. A área urbanizada corresponde a 4,61 km<sup>2</sup>, com índice de arborização das vias públicas de 46,8% (IBGE, 2022).

**Figura 1** – Área de estudo, município de Catanduvas, SC, Brasil  
Figure 1 - Study area, municipality of Catanduvas, Santa Catarina State, Brazil



Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

O clima da região, de acordo com a classificação de *Köppen*, é do tipo mesotérmico úmido, caracterizado por temperaturas amenas e precipitações bem distribuídas ao longo do ano. A temperatura média anual é de 16,9 °C, influenciada pelas condições climáticas e pelo relevo local (Catanduvas, 2024). O município situa-se a 945 m de altitude em relação ao nível do mar e apresenta predominância de Latossolos e Cambissolos, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e o Mapa de Solos de Santa Catarina elaborado pela Embrapa.

## 2.2 Espécie e delineamento amostral

A população de estudo foi composta por folhas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e pelo material particulado depositado sobre elas. A escolha dessa espécie deveu-se ao fato de ser nativa da região, abundante nas áreas amostradas e de grande relevância socioeconômica. Amplamente utilizada no preparo de chimarrão e tererê, a erva-mate é destaque no município de Catanduvas, reconhecido como “Capital Catarinense do Chimarrão” e importante produtor estadual. A espécie é uma árvore perene da família Aquifoliaceae, nativa da América do Sul, com distribuição predominante no Sul do Brasil e em países vizinhos, ocorrendo principalmente em formações florestais como a Floresta com Araucária. Em ambiente natural pode atingir grande porte, enquanto em cultivo apresenta menor altura, possuindo folhas coriáceas, serrilhadas e de dimensões médias entre 5 e 10 cm. Foram escolhidas três áreas de amostragem representando diferentes condições antrópicas do município de Catanduvas (Tabela 1). A distância entre as áreas 1 e 2 é de 5.670 metros; entre as áreas 2 e 3, de 1.777 metros; e entre as áreas 1 e 3, de 5.690 metros.

**Tabela 1** – Descrição das áreas de amostragem  
Table 1 – Description of sampling areas

Área de amostragem	Descrição
1 - Macrozona Rural	Baixa ocupação e ausência de fontes diretas de poluição.
2 - Zona de Corredor Comercial	Ocupação mista, presença de indústria ervateira e tráfego local.
3 - Zona Comercial Predominante	Núcleo urbano com tráfego intenso e proximidade da BR-282.

Fonte: Catanduvas (2024)  
Source: Catanduvas (2024)

Para as análises físico-químicas, coletaram-se 25 folhas por área (5 folhas × 5 indivíduos). Para análises botânicas, 50 folhas por área (10 folhas × 5 indivíduos), seguindo metodologias adaptadas de Freer-Smith et al. (2005) e Witkowski & Lamont (1991). As folhas foram retiradas de árvores com mais de 10 anos de idade, fisiologicamente maduras e expostas ao sol. Para as análises de solo, coletaram-se 200 g no entorno de cada indivíduo, totalizando 1 kg por área.

## 2.3 Determinação da concentração do material particulado foliar e análises físico-químicas

Para a extração do material particulado, cinco folhas de um mesmo indivíduo foram imersas em 200 mL de água ultrapura Milli-Q, mantidas sob agitação a 120 rpm por 1 h. Em seguida, as folhas foram removidas e a suspensão filtrada em filtros com porosidade de 0,45 µm (metodologia adaptada de Freer-Smith et al., 2005). O experimento foi realizado em quintuplicata. Uma solução branco, composta apenas por água deionizada, foi submetida ao mesmo procedimento e utilizada como referência nas análises de composição iônica. O material retido nos filtros foi utilizado para quantificação da concentração de material particulado foliar (mg/cm<sup>2</sup>). Para isso, determinou-se a diferença entre a massa do filtro (0,45 µm) antes e após a filtração, dividida pela área foliar correspondente. As áreas das folhas foram mensuradas por digitalização e análise de imagem utilizando

o software Sigma Scan Pro 5.0 (Witkowski & Lamont, 1991).

O filtrado foi analisado quanto aos valores de pH e condutividade elétrica, utilizando medidor multiparâmetros da marca Hanna, e quanto à presença dos ânions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  e dos cátions  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , utilizou-se as técnicas de colorimetria, espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e cromatografia de íons. Em todas as determinações aplicou-se o método de calibração externa, com preparo de soluções padrão em diferentes concentrações para estabelecimento da curva analítica e verificação da linearidade da resposta instrumental. As concentrações iônicas foram expressas em ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ).

## 2.4 Análises boitânicas

Foram analisados os seguintes atributos morfofuncionais: massa fresca foliar (g), determinada em balança analítica de precisão Shimadzu AUY 220; massa seca foliar (g), obtida após secagem das folhas em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C por 72 h, até peso constante, em balança analítica de precisão; área foliar ( $\text{cm}^2$ ), mensurada por digitalização das folhas secas dispostas em papel A4 e análise pelo software Sigma Scan Pro 5.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA); massa específica foliar ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), calculada pela razão entre massa seca e área foliar; conteúdo de água (g), calculado pela diferença entre massa fresca e massa seca (Curtt, 2019; Witkowski & Lamont, 1991). Os experimentos foram realizados em decuplicata.

## 2.5 Análises físico-químicas do solo

As análises de solo contemplaram os parâmetros descritos na Tabela 2.

**Tabela 2** – Parâmetros analisados para avaliação da qualidade do solo  
Table 2 – Soil quality assessment parameters

Parâmetro	Descrição
pH	Potenciometria
Matéria orgânica (%)	Volumetria de oxirredução
Magnésio, cálcio e alumínio ( $\text{cmol}/\text{dm}^3$ )	Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS)
Fósforo ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ )	Espectrofotometria UV-Vis (Ultravioleta-Visível)
Potássio ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ )	Fotometria de Chama
Teor de argila (%)	Densimetria
Acidez	Volumetria de neutralização

Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

Para a extração dos elementos fósforo e potássio utilizou-se solução de Mehlich-1, composta por uma mistura de ácido clorídrico e ácido sulfúrico, sendo o fósforo complexado por meio de reação com molibdato de amônio e determinação utilizando-se colorímetro. O elemento potássio foi determinado utilizando-se fotômetro de chama. Os elementos magnésio, cálcio e alumínio foram extraídos utilizando-se solução KCl 1 mol/L e determinados via espectrometria de absorção atômica, utilizando-se como diluente solução de lantânio 1%; e chama formada pela mistura óxido nítrico e acetileno, empregada na determinação de Al. O pH foi determinado utilizando-se pHmetro. O teor de argila foi determinado utilizando-se densímetro de peso específico 20/4 °C. A acidez foi determinada por volumetria de neutralização com NaOH e o teor de matéria orgânica por volumetria de oxi-redução com solução padrão de dicromato de potássio e sulfato ferroso como indicador. O cálculo da CTC foi realizado mediante a soma dos cátions trocáveis (Soma de Bases, SB) mais o Alumínio Trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) e o Hidrogênio ( $\text{H}^+$ ), sendo o cálculo SB correspondente a soma dos íons cálcio, magnésio e potássio.

## 2.6 Análises de dados

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva. A normalidade foi avaliada pelo teste de *Shapiro–Wilk*. Para comparação entre médias, utilizou-se ANOVA, seguida pelo teste post-hoc de *Tukey* quando necessário. Para comparação entre medianas, empregou-se o teste de *Kruskal–Wallis*, seguido do teste de *Dunn* quando necessário.

Em todos os testes estatísticos, adotou-se nível de significância de 5%. O coeficiente de correlação de *Spearman* foi utilizado para investigar relações entre a concentração de material particulado foliar e a concentração total de íons. Análise de Componentes Principais (PCA – *Principal Component Analysis*) foi aplicada para avaliar as relações entre os pontos de amostragem e as variáveis químicas e biológicas.

## 3. Resultados e Discussão

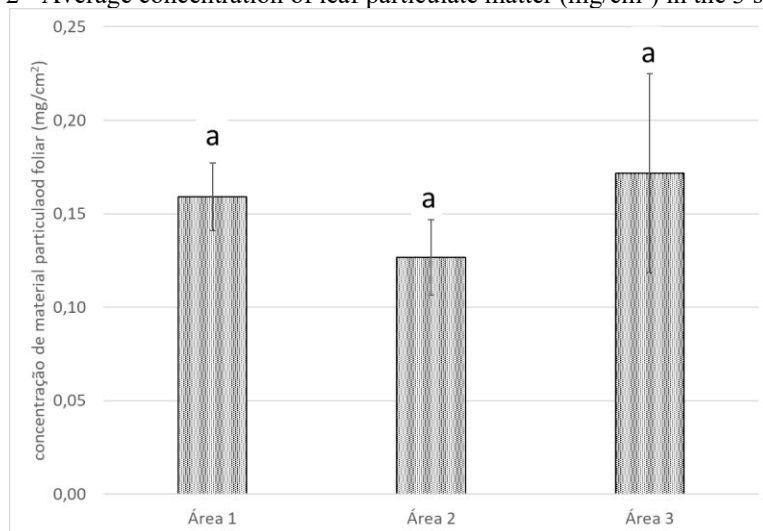
### 3.1 Concentração do material particulado foliar e análises físico-químicas

A Figura 2 mostra que as concentrações médias de material particulado foliar nas três áreas são semelhantes ( $0,16 \pm 0,02$  mg/cm<sup>2</sup> (Área 1),  $0,13 \pm 0,02$  mg/cm<sup>2</sup> (Área 2) e  $0,17 \pm 0,05$  mg/cm<sup>2</sup> (Área 3)) não havendo diferença estatisticamente significativa entre elas ( $p > 0,05$ ). O material particulado foliar corresponde à fração mais grossa e pesada do material particulado atmosférico, depositando-se rapidamente por sedimentação seca e acumulando-se normalmente próximo às fontes de emissão, ao contrário das partículas mais finas, que podem ser transportadas a longas distâncias (Beringui et al., 2021).

Em estudos realizados em Santa Catarina e Goiás, diferentes espécies vegetais foram utilizadas como bioindicadoras da poluição atmosférica. Santos et al. (2019) observaram, em Joinville, concentrações de material particulado foliar de  $3,1 \times 10^{-3} \pm 0,4 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> próximas a uma indústria metalomecânica, valor 31 vezes superior ao ponto controle. De forma semelhante, Miranda et al. (2024) registraram concentrações maiores em área urbana de Jaraguá do Sul ( $0,05 \pm 0,01$  mg/cm<sup>2</sup>) em comparação à área rural ( $0,04 \pm 0,00$  mg/cm<sup>2</sup>), com diferença estatisticamente significativa. Em outro estudo, Bonatti-Chaves et al. (2024) encontraram valores de  $3,14 \times 10^{-3} \pm 0,4 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> em área urbano-industrial e entre  $0,13 \times 10^{-3}$  e  $0,15 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> em áreas rural e de controle, correspondendo a concentrações 21 a 24 vezes maiores na região impactada. Em todos esses casos, os autores destacam a forte influência das atividades antrópicas sobre o aumento de material particulado no ambiente.

Os valores de concentração obtidos no presente estudo, embora sem diferenças estatisticamente significativas entre as áreas, foram superiores aos relatados por Santos et al. (2019), Miranda et al. (2024) e Bonatti-Chaves et al. (2024), mas semelhantes aos observados em pesquisas conduzidas por Cavallaro et al. (2019), Martins et al. (2025) e Reis (2014). Em Goiânia, Reis (2014) encontrou concentrações variando de 0,04 a 0,77 mg/cm<sup>2</sup> em *Pachira aquatica* ao longo da BR-153, sendo os maiores valores registrados próximos ao eixo da via, destacando a influência do tráfego veicular. Em Joinville, Cavallaro et al. (2019) registraram concentrações de  $0,29 \pm 0,13$  mg/cm<sup>2</sup> em área industrial e  $0,18 \pm 0,12$  mg/cm<sup>2</sup> em área rural usando *Inga edulis*, relacionando a maior carga particulada à ausência de medidas de controle industrial. Já Martins et al. (2025) identificaram valores entre 0,01 e 1,64 mg/cm<sup>2</sup> em diferentes espécies arbóreas de Jaraguá do Sul, observando menores concentrações em zonas mistas diversificadas, onde o uso do solo combina funções residenciais, comerciais e de serviços.

**Figura 2** – Concentração média de material particulado foliar ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) nas 3 áreas de amostragem  
 Figure 2 - Average concentration of leaf particulate matter ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) in the 3 sampling areas



Nota: letras iguais correspondem a ausência de diferença estatisticamente significativa entre as médias.

Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

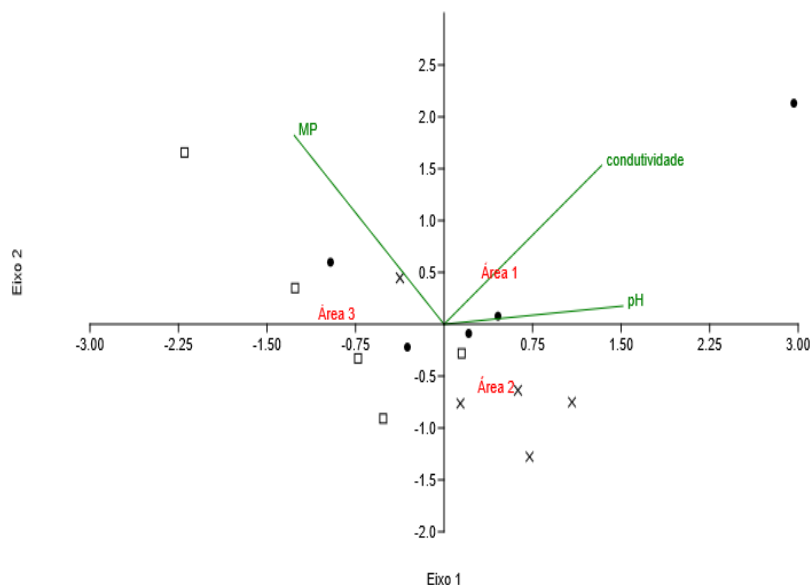
Os valores de pH das soluções foliares mostraram-se levemente ácidos nas três áreas de amostragem ( $6,22 \pm 0,14$ ,  $6,20 \pm 0,13$  e  $6,09 \pm 0,03$ ) sem diferenças estatisticamente significativas ( $p > 0,05$ ). Resultado semelhante foi relatado por Miranda et al. (2024) em Jaraguá do Sul (SC), onde valores de pH de  $6,69 \pm 0,36$  (área rural) e  $6,36 \pm 0,09$  (área urbana) também não diferiram estatisticamente. Quanto à condutividade elétrica, devido à falta de normalidade em uma das áreas, foram utilizadas medianas e médias. As medianas foram  $3,9$  ( $12,8-2,3$ ),  $3,1$  ( $5,6-2,5$ ) e  $2,8$  ( $4,6-2,0$ )  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , enquanto as médias foram  $5,3 \pm 4,2$ ,  $3,6 \pm 1,3$  e  $3,0 \pm 1,0$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente, sem diferenças significativas entre as áreas ( $p > 0,05$ ). Em comparação, Miranda et al. (2024) registraram valores de  $30 \mu\text{S}/\text{cm}$  em área urbana e  $20 \mu\text{S}/\text{cm}$  em área rural, entre 6 e 10 vezes superiores aos observados neste estudo, o que pode estar relacionado ao maior grau de industrialização de Jaraguá do Sul, município que se destaca como um dos principais polos industriais de Santa Catarina, com forte presença de setores metal-mecânico, têxtil e alimentício e posição econômica relevante no estado, enquanto Catanduvas apresenta menor intensidade de atividade industrial (dados de perfil econômico municipal e setorial).

A condutividade elétrica é um indicador indireto da carga iônica presente no material particulado foliar, refletindo compostos como sais solúveis, metais e substâncias higroscópicas depositadas na superfície das folhas. Estudos como o de Ristorini et al. (2020) demonstram forte correlação entre condutividade e concentração total de íons ( $R^2 = 0,95$  em Nápoles e  $R^2 = 0,87$  em Terni), indicando que o parâmetro pode ser uma técnica rápida, simples e de baixo custo para estimar material particulado solúvel e monitorar a qualidade do ar. No presente estudo, testes de correlação (*Spearman*) mostraram associação entre concentração iônica total e condutividade elétrica, porém sem significância estatística, já que todos os valores-p foram superiores a 5%.

A Análise de Componentes Principais (Figura 3) evidencia diferentes padrões de associação entre as áreas de amostragem e as variáveis ambientais.



**Figura 3** – Análise de Componentes Principais das variáveis concentração de material particulado, pH e condutividade  
 Figure 3 - Principal component analysis of the variables particulate matter concentration, pH, and conductivity

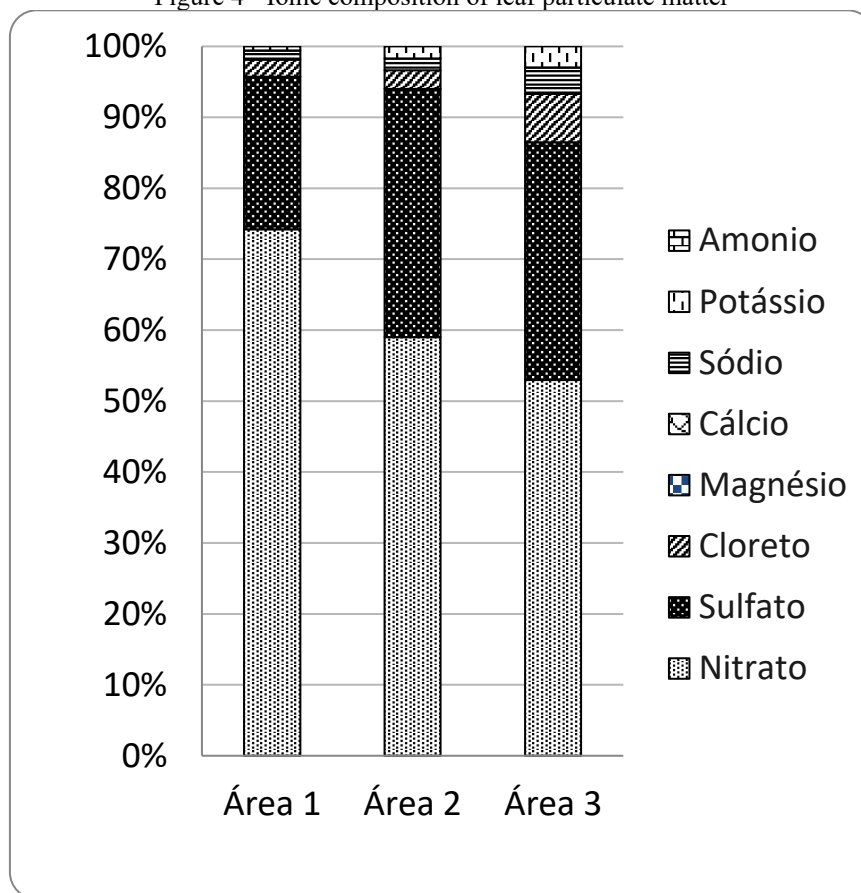


**Fonte:** Autores (2025)  
 Source: Authors (2025)

A área 1 posiciona-se na direção dos vetores de condutividade elétrica e pH, indicando maior influência de íons solúveis e de processos que alteram a acidez ou alcalinidade do ambiente, possivelmente ligados a fontes locais de emissão. A área 3 alinha-se ao vetor de material particulado (MP), sugerindo maior impacto de partículas em suspensão, potencialmente oriundas de poeira do solo, queima de biomassa ou tráfego veicular. Já a área 2 aparece próxima ao centro do gráfico, sem forte correlação com as variáveis avaliadas, indicando baixa influência dos parâmetros monitorados nessa região.

A composição iônica das soluções obtidas do material particulado foliar mostrou predominância do íon nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) em todas as áreas de amostragem, representando 74% na área 1 ( $46 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ ), 59% na área 2 ( $7 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ ) e 53% na área 3 ( $13 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ ) (Figura 4).

**Figura 4 – Composição iônica do material particulado foliar**  
 Figure 4 - Ionic composition of leaf particulate matter



Fonte: Autores (2025)  
 Source: Authors (2025)

Essa predominância está relacionada à formação secundária de nitrato a partir da oxidação de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), provenientes principalmente de emissões veiculares e processos industriais, caracterizando o nitrato como um importante indicador de poluição antrópica associada à queima de combustíveis fósseis (Ávila, 2010). Além das fontes urbanas, estudos demonstram que a dinâmica do nitrato atmosférico é modulada por fatores meteorológicos, como temperatura elevada e baixa umidade relativa, que favorecem a dissociação do  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (Da Silva, 2021), assim como por fontes indiretas, a exemplo do uso de fertilizantes nitrogenados, da decomposição de matéria orgânica, da criação de animais e da queima de biomassa, consideradas fontes secundárias por envolverem processos de transformação química na atmosfera (Ávila, 2010; Da Silva, 2021; Pré, 2022).

O sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) foi a segunda espécie iônica mais abundante, correspondendo a 22% ( $13 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ ) 35% ( $4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ ) e 34% ( $8 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ ) nas áreas 1, 2 e 3, respectivamente. De acordo com a literatura, a presença de sulfato atmosférico está relacionada principalmente à oxidação do  $\text{SO}_2$  emitido por fontes veiculares, pela combustão de combustíveis fósseis, por processos industriais (incluindo atividades da construção civil, especialmente cimenteiras) e pela queima de biomassa, podendo também resultar de reações fotoquímicas que levam à formação de ácido sulfúrico e, subsequentemente, de sulfato de amônio (Ávila, 2010; Da Silva, 2021; Pré, 2022). O cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) apresentou menores proporções,  $1 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$  na área 1

(2%),  $0,3 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> na área 2 (3%) e  $2 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> na área 3 (7%) (Figura 4) e está relacionado ao spray marinho, a transformações químicas atmosféricas, emissões industriais, queima de resíduos sólidos, uso de fertilizantes e queimadas, que podem liberar compostos como KCl (em queimadas recentes), K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e KNO<sub>3</sub> (em queimadas mais antigas) (Ávila, 2010; Da Silva, 2021; Pré, 2022).

Os íons sódio (Na<sup>+</sup>) e potássio (K<sup>+</sup>) ocorreram em baixas proporções (1 - 4% e 1 - 3%), sendo o sódio típico de aerossóis marinhos ou fontes industriais, enquanto o potássio é reconhecido como marcador da queima de biomassa, como resíduos vegetais e madeira, sugerindo influência de processos combustivos locais ou regionais (Ávila, 2010; Da Silva, 2021; Pré, 2022). Por fim, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> não foram detectados, possivelmente devido às baixas concentrações e a limitações da técnica analítica.

Em estudo semelhante, Martins et al. (2025) identificaram o sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) como o ânion de maior concentração em todas as áreas avaliadas, destacando-o como principal indicador de poluição atmosférica secundária, sobretudo em regiões com maior influência de emissões veiculares, processos industriais e oxidação de SO<sub>2</sub>. O nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) também foi detectado em todas as zonas, com maiores valores na área comercial, refletindo a influência do tráfego urbano e de fontes fixas de combustão. O cloreto (Cl<sup>-</sup>) apresentou concentrações elevadas, especialmente na zona comercial, atribuídas à influência marítima e à queima de resíduos sólidos, podendo atuar como poluente primário ligado a partículas maiores, como o material particulado foliar. Entre os cátions, destacaram-se cálcio (Ca<sup>2+</sup>), sódio (Na<sup>+</sup>) e potássio (K<sup>+</sup>), associados respectivamente a poeiras minerais, aerossóis marinhos e ressuspensão de solo e material vegetal, variando conforme o uso e ocupação do solo urbano.

O uso de razões diagnósticas entre íons solúveis auxilia na identificação de possíveis fontes de emissão do material particulado foliar: razões NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> elevadas sugerem maior contribuição de emissões veiculares (NO<sub>x</sub>) ou queima de biomassa, enquanto valores baixos indicam maior influência de fontes emissoras de SO<sub>2</sub> (combustão de carvão, indústrias); relações entre Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> apontam origem crustal ou poeira de solo, construção ou ressuspensão de materiais naturais; concentrações elevadas de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> associadas a NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ou SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> sugerem fontes agrícolas ou industriais que emitem amônia ou fertilizantes; e valores altos de Cl<sup>-</sup> e Na<sup>+</sup> podem indicar influência marinha, queima ou processos industriais com cloretos (Ávila, 2010; Da Silva, 2021; Pré, 2022).

Além das razões diagnósticas, correlações fortes entre determinados íons também auxiliam no estudo sobre possíveis fontes de emissão do material particulado foliar, por exemplo, forte correlação de K<sup>+</sup> com outros elementos típicos de biomassa ajudam a reforçar a hipótese de queima de biomassa como fonte. No presente estudo, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> não foram detectados, e as razões diagnósticas foram calculadas apenas para os íons restantes. A única correlação estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) foi entre nitrato e sulfato, nas áreas 1 e 3, com coeficientes de 0,9 e 1, respectivamente. Esses resultados indicam que os precursores desses íons estão sendo emitidos de modo que suas concentrações variam de forma parecida, podendo esta similaridade ser causada por emissão de fontes distintas, mas próximas geograficamente, como fontes veiculares e queima de biomassa. As razões diagnósticas NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> apresentaram medianas de 2,9 (1,9–3,8) na área 1 e 1,1 (0,8–3,9) na área 3.

A área 3, situada em região densamente povoada, próxima à BR-282 (255 m) e com diversas atividades urbanas e industriais (madeireiras, mecânicas, comércio, hospital, restaurantes, residências com fogão a lenha, fábrica de rações), apresentou condições compatíveis com maior emissão de poluentes. A área 1, embora rural e com baixa densidade populacional, também sofre influência da BR-282 (570 m) e de atividades como ervateira e madeireira. Já a área 2 registrou as menores concentrações iônicas, apesar da presença de múltiplas atividades potencialmente emissoras; sua maior distância da rodovia (aproximadamente 1.200 m) pode explicar tal comportamento, reforçando o papel da BR-282 como fonte relevante de poluentes na região.

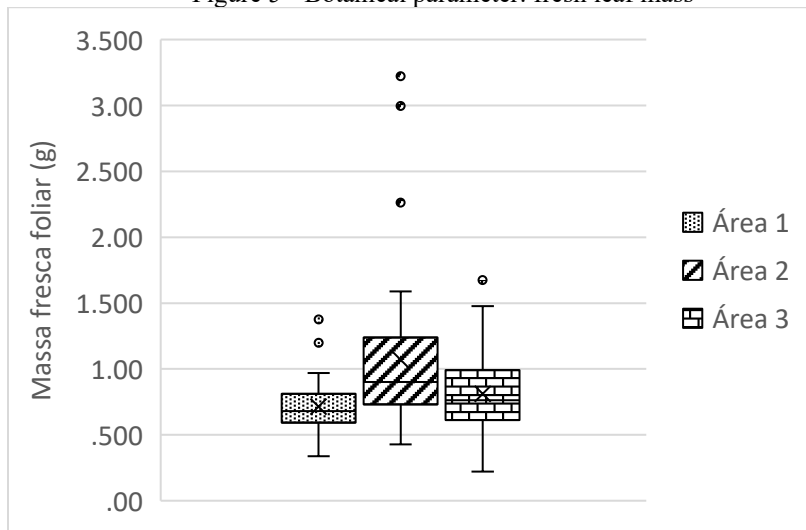
Estudos sobre composição iônica geralmente se concentram no material particulado respirável ( $\leq 2,5$  µm), sendo ainda escassas as pesquisas voltadas ao material particulado foliar. Nesse contexto, Chen et al. (2024) analisaram características botânicas e químicas do material particulado depositado em folhas de duas

espécies vegetais em ambientes aquático e terrestre. Os autores observaram que o tipo de *habitat* influencia a composição do particulado: em ambientes terrestres, as folhas acumularam partículas maiores e mais grossas, dominadas por  $\text{Ca}^{2+}$  inorgânico (>70% dos íons totais), enquanto em ambientes aquáticos houve acúmulo de partículas finas e secundárias, com altas frações de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (>65% dos ânions totais). Além disso, o acúmulo de partículas reduziu a condutância estomática, afetando transpiração e fotossíntese, fornecendo evidências sobre o papel das plantas na mitigação da poluição atmosférica urbana.

### 3.2 Análises botânicas

As Figuras 5, 6 e 7 mostram os resultados de massa fresca foliar, massa seca foliar e conteúdo de água, cujos dados não apresentaram distribuição normal segundo o teste de *Shapiro-Wilk*. Para a massa fresca, o teste de *Dunn* indicou que a área 2 apresentou a maior mediana, enquanto as áreas 1 e 3 exibiram medianas iguais entre si e inferiores à da área 2, sugerindo uma possível resposta morfofisiológica diferenciada das plantas às condições ambientais locais.

**Figura 5** – Parâmetro botânico massa fresca foliar  
Figure 5 - Botanical parameter: fresh leaf mass

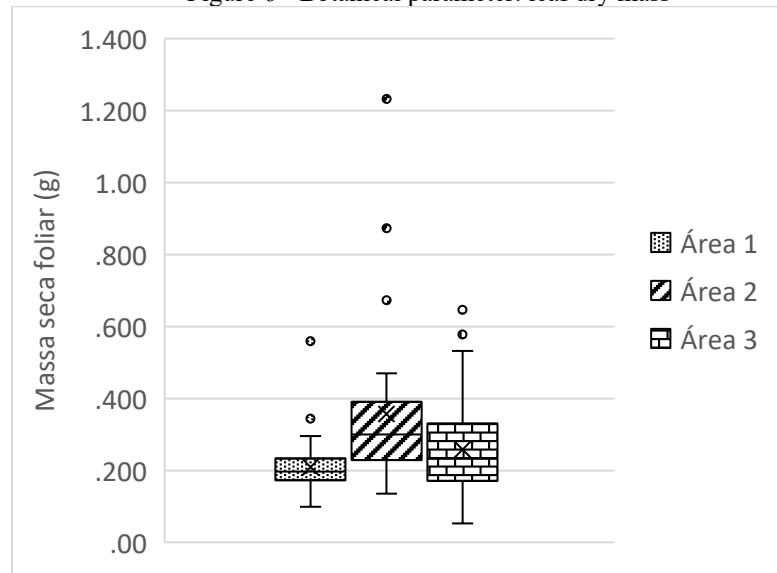


Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

Com relação ao parâmetro massa seca foliar, de acordo com teste de *Dunn*, e nível de significância de 5%, todas as medianas diferem em entre si; sendo observado maior valor na área 2, seguido da área 3 e por último a área 1.

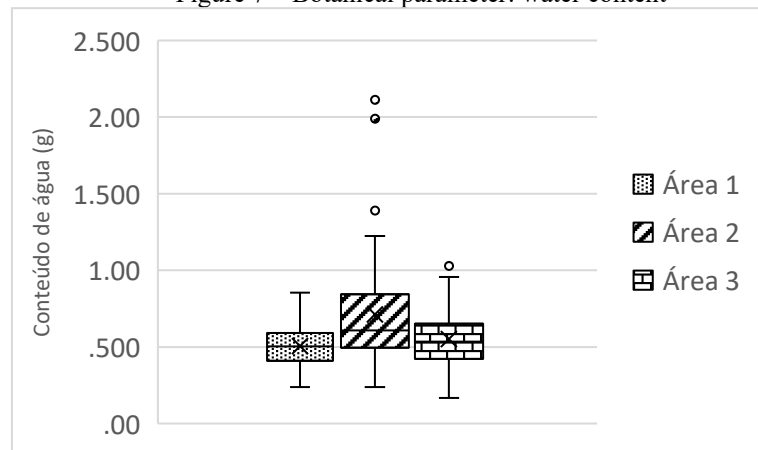
**Figura 6 –** Parâmetro botânico massa seca foliar  
**Figure 6 -** Botanical parameter: leaf dry mass



**Fonte:** Autores (2025)  
**Source:** Authors (2025)

Com relação ao parâmetro conteúdo de água, este seguiu a mesma tendência do parâmetro massa fresca foliar, isto é, a mediana na área 2 é superior, enquanto as medianas das áreas 1 e 3 são iguais entre si e inferiores à da área 2. Esta diferença pode estar relacionada a flutuações microambientais ou ao nível de estresse fisiológico enfrentado pelas plantas, possivelmente causado pela presença de fontes de poluição atmosférica ou variações no regime hídrico local.

**Figura 7 –** Parâmetro botânico conteúdo de água  
**Figure 7 –** Botanical parameter: water content

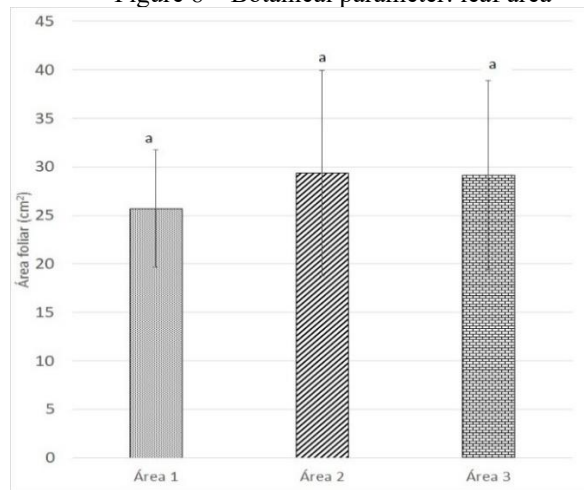


**Fonte:** Autores (2025)  
**Source:** Authors (2025)

Os demais parâmetros botânicos avaliados, área foliar e área foliar específica, apresentaram distribuição normal dos dados. Assim, optou-se por apresentar os resultados na forma de média e desvio padrão, sendo a

comparação realizada com base nas médias obtidas para cada área de amostragem (Figuras 8 e 9).

**Figura 8** – Parâmetro botânico área foliar  
Figure 8 – Botanical parameter: leaf area

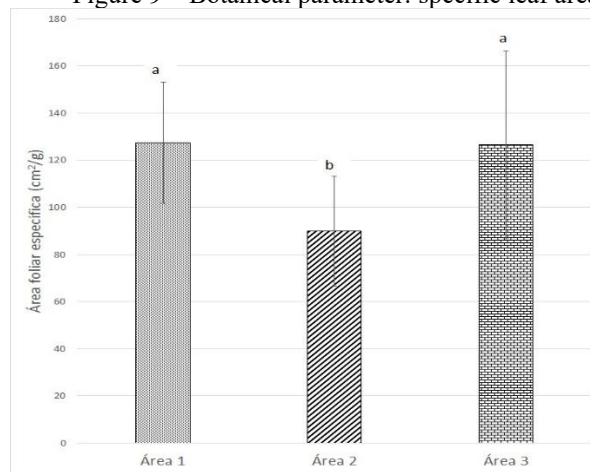


Nota: letras iguais correspondem a ausência de diferença estatisticamente significativa entre as médias.

Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

**Figura 9** – Parâmetro botânico: área foliar específica  
Figure 9 – Botanical parameter: specific leaf area



Nota: letras iguais correspondem a ausência de diferença estatisticamente significativa entre as médias.

Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

Segundo o teste ANOVA (5% de significância), não há diferença entre as médias de área foliar nas três áreas estudadas, indicando um padrão morfológico semelhante entre os indivíduos. Porém, para a área foliar específica, verificou-se diferença significativa: a área 2 apresentou média inferior, enquanto as áreas 1 e 3 exibiram médias iguais entre si e superiores à da área 2. Valores mais altos de área foliar específica refletem redução dos tecidos do mesofilo, caracterizando uma resposta adaptativa ao estresse ambiental, priorizando a manutenção estrutural da folha em vez da capacidade fotossintética (Schaidhauer et al., 2024).

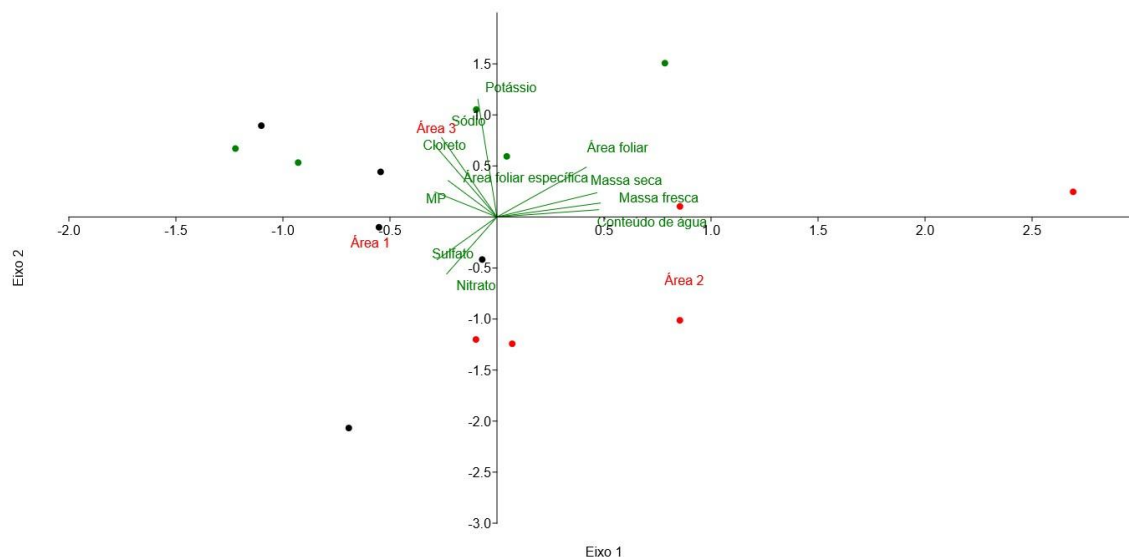
Cavallaro et al. (2019), ao estudarem *Inga edulis* em uma área industrial e em uma área controle em Joinville/SC, observaram que indivíduos expostos à poluição apresentaram maior área foliar específica e reduções significativas na espessura da epiderme adaxial e abaxial, no parênquima paliádico, no parênquima lacunoso e na espessura total do limbo foliar. Essas alterações, diretamente relacionadas à capacidade fotossintética, indicam que o acúmulo de material particulado prejudica a difusão de CO<sub>2</sub> e a incidência de luz, afetando a fisiologia vegetal. Plantas da área controle exibiram maiores valores de massa fresca, massa seca e área foliar, sugerindo que ambientes menos poluídos favorecem o investimento em tecidos fotossintetizantes e crescimento.

A análise de *Pearson* mostrou correlações negativas entre a concentração de material particulado e vários atributos morfoanatômicos, especialmente a espessura total do limbo ( $r = -0,60$ ), massa seca ( $r = -0,42$ ) e massa fresca ( $r = -0,38$ ). Esses resultados demonstram que *Inga edulis* responde de forma sensível à poluição atmosférica, atuando como bioindicadora eficaz, e reforçam o valor de espécies nativas em programas de biomonitoramento e no suporte a políticas públicas de mitigação de impactos ambientais. Neste trabalho, testes de correlação de *Spearman* foram aplicados para avaliar a relação entre a concentração de material particulado foliar e os parâmetros botânicos (massa fresca, massa seca, conteúdo de água, área foliar e área foliar específica) nas três áreas de estudo. Na área 2, foram observadas correlações negativas para massa fresca, massa seca, conteúdo de água e área foliar, bem como correlação positiva para a área foliar específica. Resultados semelhantes foram reportados por dos Santos et al. (2019), os quais demonstraram que, em áreas sob maior influência antrópica, *Alchornea glandulosa* responde sensivelmente à poluição atmosférica, apresentando reduções de massa fresca, massa seca, conteúdo de água e área foliar, associadas ao aumento da área foliar específica, caracterizando um padrão de resposta adaptativa ao estresse ambiental e reforçando seu potencial como espécie bioindicadora. No presente trabalho, contudo, todas as correlações apresentaram valores-p superiores a 5%, não sendo estatisticamente significativas.

De forma semelhante, Schaidhauer et al. (2024) observaram que *Piper gaudichaudianum* apresentou reduções significativas ( $p < 0,001$ ) nos teores de clorofilas A, B e total, além de menor massa fresca, massa seca e área foliar em área próxima a fontes industriais, evidenciando prejuízos à fotossíntese e ao crescimento vegetal. A Análise de Componentes Principais, que explicou 74% da variabilidade, destacou o teor de clorofila e massa foliar como principais parâmetros discriminantes, reforçando a eficiência da espécie como bioindicadora. Em contexto internacional, Devkota et al. (2024) registraram reduções significativas ( $p < 0,05$ ) na área foliar de seis espécies avaliadas em áreas poluídas de Kathmandu, com maiores declínios em *Euphorbia pulcherrima* (25% no comprimento; 18,62% na largura) e *Lagerstroemia indica* (28% na área foliar), e menores em *Nerium oleander* e *Callistemon citrinus*. Esses achados confirmam que diversas espécies vegetais apresentam respostas consistentes aos efeitos da poluição atmosférica.

A Análise de Componentes Principais das variáveis botânicas analisadas neste trabalho (Figura 10), mostrou que massa fresca e massa seca explicaram 95,7% da variância total, permitindo o uso de dois eixos: o eixo 1, associado a massa fresca, massa seca, conteúdo de água e área foliar, e o eixo 2, associado à área foliar específica.

**Figura 10** – Análise de Componentes Principais das variáveis botânicas e químicas (íons)  
 Figure 10 – Principal component analysis of botanical and chemical variables (ions)



**Fonte:** Autores (2025)  
**Source:** Authors (2025)

A área 2 apresentou maiores valores no eixo 1, enquanto as áreas 1 e 3 se destacaram no eixo 2. Valores elevados no eixo 2, associados a maior área foliar específica, são indicativos de maior exposição à poluição e às atividades antrópicas, conforme descrito por Cavallaro et al. (2019) e dos Santos et al. (2019). Esses autores ressaltam, contudo, que, além da qualidade do ar, a qualidade do solo também exerce influência sobre o desenvolvimento vegetal. No presente estudo, a análise subsequente, isto é, a análise da qualidade do solo, revelou diferenças químicas marcantes entre as três áreas, o que impossibilita atribuir exclusivamente à qualidade do solo as variações observadas nos parâmetros botânicos.

Embora se esperasse que a área 1, localizada na Macrozona Rural, apresentasse melhores indicadores botânicos, observou-se que ela apresentou similaridade com a área 3, especialmente quanto à área foliar específica, um sinal de estresse ambiental. Apesar de rural, a área 1 está próxima à BR-280 (570 m), rodovia de intenso tráfego, o que pode ter influenciado a composição iônica do material particulado foliar.

Nessa área, foram registradas as maiores concentrações de nitrato e sulfato, com valores de  $46 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> e  $13 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup>, respectivamente, em comparação às áreas 2 e 3. A maior presença de nitrato pode estar relacionada ao tráfego da rodovia e também ao uso de fertilizantes nitrogenados, criação de animais e queima de biomassa. Já o aumento de sulfato pode derivar da combustão de combustíveis fósseis e da queima de biomassa, que liberam SO<sub>2</sub>, posteriormente convertido em sulfato por processos atmosféricos (Ávila, 2010; Da Silva, 2021; Pré, 2022).

Os resultados apresentados demonstram que a associação entre bioindicadores vegetais e métodos químicos e botânicos constitui uma ferramenta eficiente, acessível e de baixo custo para o monitoramento ambiental urbano, contribuindo para a identificação de fontes de poluição e para a compreensão da dinâmica do material particulado.



### 3.2 Análise do solo

A Tabela 3 reúne os principais parâmetros químicos utilizados para avaliar a qualidade do solo, incluindo pH, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e capacidade de troca catiônica (CTC). O pH indica a acidez ou alcalinidade e influencia a absorção de nutrientes e de elementos tóxicos.

**Tabela 3** – Interpretação de parâmetros da análise de solo  
Table 3 – Interpretation of soil analytical parameters

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
pH	4,3 – baixo	4,4 – baixo	5,0 – baixo
Matéria orgânica (%)	4,1 – médio	3,1 – médio	8,2 – alto
Cálcio (cmolc/dm <sup>3</sup> )	1,9 – baixo	3,3 – médio	21,4 – alto
Magnésio (cmolc/dm <sup>3</sup> )	0,8 – médio	1,8 – alto	4,5 – alto
Fósforo (mg/dm <sup>3</sup> )	2,2 – muito baixo	1,6 – muito baixo	2,2 – muito baixo
Potássio (mg/dm <sup>3</sup> )	82,8 – médio	170,6 – alto	137,3 – alto
CTC pH 7,0 (cmolc/dm <sup>3</sup> )	24,04 – alto	20,90 – alto	37,17 – alto

Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

A matéria orgânica melhora a fertilidade, aumentando a retenção de nutrientes e a estrutura do solo. Os nutrientes exercem funções essenciais: o fósforo atua na formação de raízes, floração e metabolismo energético; o potássio regula a abertura estomática, o movimento de água e a resistência a doenças; o cálcio participa da estrutura das paredes celulares e da ativação enzimática; e o magnésio é componente central da clorofila, fundamental para a fotossíntese. A CTC reflete a capacidade do solo de reter e liberar cátions, reduzindo perdas por lixiviação (Sobral et al., 2015).

O pH do solo nas três áreas apresentou-se ácido, abaixo da faixa ideal de 6,0 a 6,8. Contudo, a erva-mate é naturalmente adaptada a solos de alta acidez e elevados teores de alumínio, sendo classificada como espécie calcífuga e tolerante ao alumínio (Peixoto et al., 2022). Os teores de matéria orgânica foram de 4,1%, 3,1% e 8,2% (áreas 1, 2 e 3). Segundo Sobral (2015), esses valores correspondem a teores médios (áreas 1 e 2) e alto (área 3). Para cálcio e magnésio, a área 1 apresentou disponibilidade baixa (Ca) e média (Mg); a área 2, média (Ca) e alta (Mg); e a área 3, alta para ambos.

Quanto ao potássio, baseado na CTC pH 7,0, a área 1 foi classificada como teor médio, enquanto as áreas 2 e 3 apresentaram teores altos. A CTC foi classificada como alta em todas as áreas, indicando bom potencial de retenção e disponibilização de nutrientes, embora dependente da saturação por bases e do pH. O fósforo foi classificado como muito baixo em todas as áreas, coerente com os teores de argila (31%, 53% e 42%) e com a característica da erva-mate de acumular fósforo nos tecidos para compensar solos pobres nesse nutriente (Sobral, 2015). Segundo o SiBCS e o Mapa de Solos de SC (Embrapa), a região de Catanduvas é dominada por latossolos e cambissolos, solos produtivos, porém marcados por acidez elevada e baixa disponibilidade de fósforo, o que demanda a adoção de práticas de manejo adequadas, como calagem, adubação orgânica e técnicas conservacionistas, para mitigar essas limitações.

#### 4. Conclusão

A aplicação de *Ilex paraguariensis* como bioindicadora mostrou-se eficaz para avaliar a qualidade do ar e identificar possíveis fontes de emissão. As concentrações de material particulado foliar (entre 0,105 e 0,172 mg/cm<sup>2</sup>), embora sem diferenças significativas entre as áreas, foram compatíveis com valores registrados em centros urbanos maiores, indicando influência de atividades antrópicas locais. A análise da composição iônica evidenciou predominância de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e Cl<sup>-</sup>, íons associados a fontes como tráfego veicular, combustão de combustíveis fósseis, processos industriais, queima de resíduos e uso de fertilizantes.

As maiores concentrações ocorreram nas áreas 1 e 3, que também apresentaram redução de massa fresca, massa seca e conteúdo de água, além de maior área foliar específica, indicando respostas adaptativas ao estresse ambiental e maior impacto da poluição atmosférica. A composição iônica das soluções obtidas do material particulado foliar revelou a predominância do íon nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) em ambas as áreas, com concentrações de  $46 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> na área 1 e  $13 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> na área 3. O sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) foi a segunda espécie iônica mais abundante, apresentando concentrações de  $13 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> na área 1 e  $8 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> na área 3, enquanto o cloreto (Cl<sup>-</sup>) apresentou menores concentrações, com valores de  $1 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> na área 1 e  $2 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup> na área 3.

O estudo demonstra que o uso combinado de bioindicadores vegetais e métodos químicos e botânicos constitui uma estratégia eficiente, acessível e de baixo custo para o monitoramento ambiental urbano, auxiliando na identificação de fontes de poluição e na compreensão da dinâmica do material particulado.

#### 5. Agradecimentos

Os pesquisadores agradecem ao Fundo de Apoio a Pesquisa da Univille (FAP/UNIVILLE) pelo apoio financeiro.

#### 6. Referências

- Alves, C. dos A., Feliciano, M. J. S. (2022). Poluição do ar numa megacidade africana: fontes e implicações na saúde (Projeto PTDC/2022.04240). **Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT)**. <https://doi.org/10.54499/2022.04240.PTDC>
- Arriazu-Ramos, A., Santamaría, J. M., Monge-Barrio, A., Bes-Rastrollo, M., Gutierrez Gabriel, S., Benito Frias, N., & Sánchez-Ostiz, A. (2025). Health Impacts of Urban Environmental Parameters: A Review of Air Pollution, Heat, Noise, Green Spaces and Mobility. **Sustainability**, 17(10), 4336. <https://doi.org/10.3390/su17104336>
- Avila, S. G. (2010). **Determinação de íons solúveis em água no material particulado MP10 coletado na Cidade Universitária - São Paulo, 2003**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.46.2011.tde-12042011-091927. Recuperado em 2025-12-15, de [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)
- Baesso Moura, B., Zammarchi, F., Hoshika, Y., Martinelli, F., Paoletti, E., & Ferrini, F. (2024). Comparing different methodologies to quantify particulate matter accumulation on plant leaves. **Urban Science**, 8(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/urbansci8030125>
- Beringui, K., Quijano, M. F. C., Justo, E. P. S., Ventura, L. M. B., & Gioda, A.. (2021). Avaliação da concentração e composição inorgânica do material particulado coletado no estado do Rio de Janeiro. **Química Nova**, 44(6), 737–754. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170717>

Bonatti-Chaves, M., Macalossi, J., Cabral, R. D. C., Dias dos Santos, M., Pfundner, P., Bonatti, M., Sieber, S., Medeiros, S. H. W., Mouga, D. M. D. da S., Gumboski, E. L., & Melo Junior, J. C. F. de. (2024). Assessing ecosystem resilience: effects of different environments on native flora, lichens and bee pollen in a mid-sized Brazilian city. **Environmental Research Communications**, 6(10), 1–10. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad7e82>

Cardoso, K. M., De Paula, A., Dos Santos, J. S., & Dos Santos, M. L. P. (2017). Uso de espécies da arborização urbana no biomonitoramento de poluição ambiental. **Ciencia Florestal**, 27(2), 535–547. <https://doi.org/10.5902/1980509827734>

Prefeitura Municipal de Catanduvas. (2024). Principais atividades econômicas. <https://catanduvas.sc.gov.br/pagina-2623/>

Cavallaro, R., Melo Júnior, J. C. F. de, Bonatti-Chaves, M., & Renner, G. D. R. (2019). Avaliação do efeito da poluição atmosférica em populações urbanas de *Inga edulis* mart. (fabaceae) por meio do método de biomonitoramento passivo. **Connection line - revista eletrônica do UNIVAG**, (20). <https://doi.org/10.18312/connectionline.v0i20.1246>

Carvalho, P. E. R. (2003). Erva-mate (*Ilex paraguariensis*). In P. E. R. Carvalho (Ed.), **Espécies arbóreas brasileiras** (Vol. 1, pp. 455–466). Embrapa Florestas.

Curt, F. F. (2019). **Estimativa de área foliar na cultura da soja usando os métodos de dimensões foliares e imagens digitais**. 2019. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, São Paulo.

Da Silva, L. C. M. (2021). **Caracterização química do material particulado atmosférico (MP<sub>10</sub>) do Distrito Federal**. Trabalho de conclusão do curso (Graduação em Química Tecnológica), Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal.

Devkota, A., Shrestha, S., & Jha, P. (2024). Effect of air pollution on the leaf morphology and anatomy of common plant species of Kathmandu Valley . **European Journal of Ecology**, 10(1). <https://doi.org/10.17161/euroj ecol.v10i1.19487>

Dos Santos, G. S., Dos Santos, M. D., De Melo Júnior, J. C. F., Bonatti-Chaves, M., Da Silva Mouga, D. M. D., & Gumboski, E. L. (2019). Avaliação do potencial bioindicador de *Alchornea glandulosa* no monitoramento da poluição atmosférica. **Acta Biológica Catarinense**, 6(1), 93. <https://doi.org/10.21726/abc.v6i1.808>

Freer-Smith, P. H., Beckett, K. P., & Taylor, G. (2005). Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides trichocarpa* “Beaupré”, *Pinus nigra* and *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. **Environmental Pollution**, 133(1), 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.03.031>

Karimi, B., & Samadi, S. (2024). Long-term exposure to air pollution on cardio-respiratory, and lung cancer mortality: a systematic review and meta-analysis. **Journal of environmental health science & engineering**, 22(1), 75–95. <https://doi.org/10.1007/s40201-024-00900-6>

Lima, J. R., Salgado, B. C. B., Cavalcante, F. S. Á., Oliveira, M. L. M., Araújo, R. S. (2020). Assessment of air pollution in the industrial area of the maracanaú district in Ceara State, Brazil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 25(3), 521–530. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020175292>

Martins, I. L., Pezzin, A. P. T., Medeiros, S., Bonatti-Chaves, M. (2025). Árvores urbanas na sinalização de

alterações na qualidade do ar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 18(5), 3414–3428. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.05.p3414-3428>

Miranda, M. W. V. de, Karnopp, E., Barp, G. D., Maia, B. G. de O., Pezzin, A. P. T., Melo Júnior, J. C. F., Chaves, M. B. (2024). Avaliação do efeito da poluição atmosférica, em termos de concentração de material particulado foliar, sobre o bioindicador *Schinus terebinthifolia*. **Caderno de Iniciação à Pesquisa (UNIVILLE)**, 26, 66–72.

Perry, L., Mizen, A., Ellis-Davies, K., Fry, R., & Isham, A. (2025). Ambient air pollution and birth outcomes: a scoping review to investigate the mediating and moderating variables-protocol. **BMJ open**, 15(2), e088477. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-088477>

Popek, R., Łukowski, A., Roy, A., Mandal, M., Przybysz, A., Zając, Z., & Sarkar, A. (2025). Combined efficiency of tree and shrub vegetation barriers in mitigating PM, TEs, and PAHs along urban roadways. **International Journal of Phytoremediation**, 1–8. <https://doi.org/10.1080/15226514.2025.2555595>

Pré, H. L. S., Araujo, T. M. R., Almeida, C. M. S., & Giôda, A. (2022). Estudo dos principais íons solúveis em água presentes em material particulado (MP<sub>10</sub>) coletado na região urbana de Campos dos Goytacazes — RJ. In **Anais da 45ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**. Sociedade Brasileira de Química.

Reis, A. F. dos. (2014). **Análise da dispersão de poluentes de origem veicular na BR-153 e sua relação com o uso do solo em área urbana do município de Goiânia** (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Goiás, Goiânia. <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3682>

Santos, F. Pinto, J., Maciel, F., Horta, F., Albuquerque, T., Andrade, M. (2019). Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP<sub>2,5</sub>) em Belo Horizonte, MG. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**. 24, 371-381. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019174045>.

Santos, G. S. dos, Santos, M. D. dos, Melo Junior, J. C. F. de, Chaves, M. B., Mouga, D. M. da S., Gumboski, E. L. (2019). Avaliação do potencial bioindicador de *Alchornea glandulosa* no monitoramento da poluição atmosférica. **Acta Biológica Catarinense**, 6(1), 93–102.

Santos, J. M., Reis Júnior, N. C., Galvão, E. S. (Orgs.). (2022). **Material particulado na atmosfera urbana e suas interações com a saúde humana** (1ª ed.). Goiânia, GO: Alta Performance.

Schaidhauer, A. C. G., Costa, F. V. da, Melo-Júnior, J. C. F. de. (2024). Air pollution generated in an industrial region: effect on the cardiovascular health of humans and damage caused to a plant species, *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae), used for biomonitoring. **Environmental Pollution**, 124584. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124584>

Seibert, O. G., Pinto, W. de P., Monte, E. Z. (2022). Índice de poluição atmosférica: uma proposta baseada em dados secundários para avaliação da qualidade do ar. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 27(6), 1209–1219. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220210321>

Sobral, L. F., Barretto, M. C. V., Silva, A. J., dos Anjos, J. L. (2015). **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 13 p. Disponível em: <[www.bdpa.cnptia.embrapa.br](http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br)>.

Sorana, V. A. dos S., Silva, C. A. da. (2024). Concentrações de material particulado inalável (MPI) e qualidade do ar na cidade de Dourados (MS): os arquipélagos de MPI nos episódios de inverno e primavera de 2017. **Geofronter**, 10, e8488. <https://doi.org/10.61389/geofronter.v10.8488>

Witkowski, E. T. F., Lamont, B. B. (1991). Leaf specific mass confounds leaf density and thickness. **Oecologia**, 88(4), 486–493. <https://doi.org/10.1007/BF00317710>

World Health Organization. (2024). **Ambient (outdoor) air pollution and health**. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Acesso em: 30/08/2024.

Xu, H., Wang, W., Wang, H., Sun, Y., Zhong, Z., Wang, S. (2019). Differences in quantity and composition of leaf particulate matter and morphological structures in three evergreen trees and their association in Harbin, China. **Environmental Pollution**, 252 (Part B), 1772-1790. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.124>.