

UNIVERSIDADE DO PLANALTO CATARINENSE – UNIPLAC
UNIVERSIDADE DO CONTESTADO – UNC
UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS PRODUTIVOS - PPGSP

BEATRIZ CHINATO BEGNINI CASAGRANDE

***Ilex paraguariensis* (ERVA-MATE) COMO BIOINDICADORA DA QUALIDADE DO AR E DE POSSÍVEIS
FONTES DE EMISSÃO DE POLUENTES EM CATANDUVAS, SC**

LAGES/SC

2025

BEATRIZ CHINATO BEGNINI CASAGRANDE

***Ilex paraguariensis* (ERVA-MATE) COMO BIOINDICADORA DA QUALIDADE DO AR E DE POSSÍVEIS FONTES DE EMISSÃO DE POLUENTES EM CATANDUVAS, SC**

Dissertação de Mestrado, vinculada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP em forma associativa entre UNIPLAC, UNC, UNESC e UNIVILLE, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre(a) em Sistemas Produtivos.

Orientadora: Profa Dra Mariane Bonatti Chaves

Coorientador: Profa Dra Lenita Agostinetto

LAGES/SC

2025

Ficha Catalográfica

C334i Casagrande, Beatriz Chinato Begnini
Ilex paraguariensis (erva mate) como bioindicadora da qualidade do ar e de possíveis fontes de emissão de poluentes em Catanduvas, SC / Beatriz Chinato Begnini Casagrande ; orientadora Prof. Dra. Mariane Bonatti Chaves ; coorientadora Prof. Dra. Lenita Agostinetti. – 2025.
69f.

Dissertação (Mestrado em Sistemas Produtivos) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense ; Universidade do Contestado ; Universidade do Extremo Sul Catarinense ; Universidade da Região de Joinville. Lages, SC, 2025.

1. Poluição Atmosférica. 2. Controle do Ar. 3. Monitoramento Ambiental. 4. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. I. Chaves, Mariane Bonatti (orientadora). II. Agostinetti, Lenita (coorientadora). III. Universidade do Planalto Catarinense. IV. Universidade do Contestado. V. Universidade do Extremo Sul Catarinense VI. Universidade da Região de Joinville. VII. Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos. VIII. Título.

CDD 658.5

FOLHA DE APROVAÇÃO
BEATRIZ CHINATO BEGNINI CASAGRANDE

***Ilex paraguariensis* (ERVA-MATE) COMO BIOINDICADORA DA QUALIDADE DO AR E DE POSSÍVEIS FONTES DE EMISSÃO DE POLUENTES EM CATANDUVAS, SC**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a **Dissertação** apresentada no Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP, Linha de Pesquisa 2: *Sistemas Produtivos e Sustentabilidade*, em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, a Universidade do Contestado – UNC, a Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e a Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Sistemas Produtivos**.

Banca Examinadora



Documento assinado digitalmente

MARIANE BONATTI CHAVES
Data: 04/03/2026 13:14:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Mariane Bonatti Chaves – PPGSP/ UNIVILLE
Presidente da Banca / Orientadora



Documento assinado digitalmente

LENITA AGOSTINETTO
Data: 04/03/2026 11:36:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Lenita Agostinetta – PPGSP/UNIPLAC
Coorientadora



Profa. Dra. Adriana Gioda - PUC-Rio
Membro externo da banca



Documento assinado digitalmente

OSCAR RUBEM KLEGUES MONTEDO
Data: 04/03/2026 12:37:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo – PPGSP/UNESC
Membro interno da banca

Lages, SC, 30, setembro 2025

DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista à memória do meu avô, Nerido Begnini, que sempre me incentivou a estudar e a correr atrás dos meus sonhos. Sua fé em mim, seus conselhos e seu exemplo de dedicação foram e sempre serão minha maior inspiração. Carrego comigo o orgulho de ser sua neta e a certeza de que, onde quer que esteja, o senhor continua torcendo por mim.

Com amor e gratidão eternos.



AGRADECIMENTOS

Agradecimentos institucionais:

À Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, a Universidade do Contestado UNC, a Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e a Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE;
À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

RESUMO

CASAGRANDE, Beatriz Chinato Begnini. ***Ilex paraguariensis* (ERVA-MATE) COMO BIOINDICADORA DA QUALIDADE DO AR E DE POSSÍVEIS FONTES DE EMISSÃO DE POLUENTES EM CATANDUVAS, SC.** (2025), 69 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Produtivos). Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, da Universidade do Contestado – UNC, da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Lages, (2025).

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. No entanto, não existem dados prévios sobre a qualidade do ar na região. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade da espécie *Ilex paraguariensis* (erva-mate) como bioindicadora da qualidade do ar, utilizando análises químicas e botânicas como um método de monitoramento indireto, econômico e viável para municípios de pequeno porte, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU, especialmente aqueles relacionados à saúde ambiental e cidades sustentáveis. Foram selecionadas três áreas de amostragem localizadas em diferentes zoneamentos do município de Catanduvas: área 1 – Macrozona, 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/cm², valores comparáveis aos registrados em cidades maiores, como Joinville, Jaraguá do Sul e Goiânia. Na composição iônica, destacaram-se os íons nitrato (NO₃⁻), sulfato (SO₄²⁻) e cloreto (Cl⁻), 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-chave: poluição atmosférica; bioindicador vegetal; *Ilex paraguariensis*; qualidade do ar; monitoramento ambiental; objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS).

ABSTRACT

CASAGRANDE, Beatriz Chinato Begnini. *Ilex paraguariensis* (ERVA-MATE) AS A BIOINDICATOR OF AIR QUALITY AND POSSIBLE SOURCES OF POLLUTANT EMISSIONS IN CATANDUVAS, SC. (2025), 69 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Produtivos). Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, da Universidade do Contestado – UNC, da Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC e da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Lages, (ano).

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. However, there are no previous data on air quality in the region. This study aimed to evaluate the applicability of the species *Ilex paraguariensis* (yerba mate) as a bioindicator of air quality, using chemical and botanical analyses as an indirect, economical, and feasible monitoring method for small municipalities, in line with the United Nations 2030 Agenda for Sustainable Development Goals (SDGs), particularly those related to environmental health and sustainable cities. Three sampling areas located in different zoning regions of the municipality of Catanduvas were selected: Area 1 – 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/cm², values comparable to those recorded in larger cities such as Joinville, Jaraguá do Sul, and Goiânia. In the ionic composition, nitrate (NO₃⁻), sulfate (SO₄²⁻), and chloride (Cl⁻) 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; plant bioindicator; *Ilex paraguariensis*; air quality; environmental monitoring; sustainable development goals (SDG).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da interdisciplinaridade envolvida no projeto de dissertação.....	166
Figura 2 - Classificação da pesquisa.....	30
Figura 3 - Local de estudo, município de Catanduvas, SC, Brasil.....	31
Figura 4 - Espécie <i>Ilex Paraguariensis</i>	32
Figura 5 - Zoneamento do município de Catanduvas e localização das áreas de amostragem.....	344
Figura 6 - Metodologia para a coleta das folhas de erva-mate.....	355
Figura 7 - Etapas da pesquisa.....	366
Figura 8 - Análises físico-química e botânicas.....	377
Figura 9 - Fluxograma das análises de folhas e solo.....	388
Figura 10 - Processos de pesagem e secagem das folhas de <i>Ilex Paraguariensis</i> (erva-mate).....	40
Figura 11 - Concentração média de material particulado foliar (mg/cm^2) nas 3 de amostragem.....	42
Figura 12 - Análise de componentes principais das variáveis concentração de material particulado, pH e condutividade.....	466
Figura 13 - Composição iônica do material particulado atmosférico.....	477
Figura 14 - Parâmetro botânico massa fresca foliar.....	511
Figura 15 - Parâmetro massa seca foliar.....	522
Figura 16 - Parâmetro conteúdo de água.....	522
Figura 17 - Parâmetro área foliar.....	533
Figura 18 - Parâmetro área foliar específica.....	533
Figura 19 Análise de componentes principais das variáveis botânicas.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos analíticos para quantificação dos íons solúveis	399
Tabela 2 - Interpretação de parâmetros da análise de solo	58



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	122
1.1 PROBLEMA	122
1.2 OBJETIVOS	133
1.2.1 Objetivo geral	133
1.2.2 Objetivos específicos	133
1.3 JUSTIFICATIVA	133
1.3.1 Inserção social esperada	144
1.4 CARACTERIZAÇÃO INTERDISCIPLINAR E ADERÊNCIA AO PROGRAMA	155
1.5 ESTRUTURA GERAL DO DOCUMENTO	166
2 PANORAMA TEÓRICO	177
2.1 POLUIÇÃO AMBIENTAL	177
2.2 POLUIÇÃO DO AR	188
2.3 POLUENTES ATMOSFÉRICOS	19
2.4 BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO AR	211
2.5 ESTUDOS RELACIONADOS AO BIOMONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR	222
2.6 IDENTIFICAÇÃO DE POSSÍVEIS FONTES DE EMISSÃO	244
2.7 DISPERSÃO DO MATERIAL PARTICULADO FOLIAR	277
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	299
3.1 ABORDAGEM, OBJETIVOS, PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS DE PESQUISA	299
3.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	30
3.2.1 Descrição do local e população em estudo	30
3.2.2 Cálculo do tamanho de amostra e processo de amostragem	322
3.2.3 Etapas da pesquisa	355
3.3 PROCESSO DE COLETA DE DADOS	366
3.3.1. Determinação da concentração do material particulado foliar e análises físico-químicas	37
3.3.2. Análises botânicas	40
3.3.3. Análises físico-químicas do solo	41
3.4 PROCESSO DE ANÁLISE DE DADOS	41
3.5 PROCEDIMENTOS ÉTICOS DA PESQUISA	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42

4.1 ACHADOS CIENTÍFICOS.....	42
4.1.1 Concentração do material particulado foliar e análises físico-químicas.....	42
4.1.2 Análises botânicas.....	511
4.1.3. Análise do solo.....	58
4.2 APLICABILIDADE DO ESTUDO.....	599
5 REPERCUSSÕES E CARÁTER INOVADOR DA PESQUISA.....	61
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	622
REFERÊNCIAS.....	633

1 INTRODUÇÃO

A Resolução CONAMA nº 506/2024 define como poluente atmosférico qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que 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 e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade. Os poluentes atmosféricos são originados por meio de fontes classificadas como antrópicas —predominantemente oriundas de atividades urbanas e industriais, como a emissão veicular e processos industriais —e naturais, como poeira e erupções vulcânicas.

A implementação de estratégias eficazes de gestão ambiental e o monitoramento da qualidade do ar, incluindo a quantificação de poluentes e identificação de possíveis fontes emissoras, são fundamentais para mitigar os impactos ambientais e à saúde pública. Nesse contexto, o biomonitoramento utilizando plantas surge como uma alternativa viável e de menor custo em relação aos métodos tradicionais de monitoramento atmosférico.

1.1 PROBLEMA

A poluição atmosférica está associada a diversas doenças respiratórias e cardiovasculares, além de aumentar o risco de abortos espontâneos, mortalidade infantil e câncer de pulmão. Estima-se que cause entre 6,7 e 8,1 milhões de mortes prematuras por ano no mundo. O material particulado fino ($PM_{2,5}$) é o principal responsável, com cerca de 4,1 a 4,2 milhões de mortes anuais, seguido pelo ozônio troposférico (O_3), que causa aproximadamente 365 mil, e pelo dióxido de nitrogênio (NO_2), associado a até 1,7 milhão de mortes. Esses poluentes têm origem principalmente na queima de combustíveis fósseis e configuram a poluição do ar como uma das maiores ameaças ambientais à saúde humana (OMS, 2017; G. S. dos Santos et al., 2019; J. M. Santos et al., 2022; Schaidhauer et al., 2024).

Além dos danos diretos à saúde, a poluição do ar gera impactos sociais e econômicos significativos, como o aumento dos custos com o sistema de saúde, a redução da produtividade laboral e escolar e a queda na produtividade agrícola, já que a vegetação também é afetada pela deposição de poluentes. Comunidades em situação de vulnerabilidade social sofrem ainda mais, pois estão mais expostas aos efeitos da má qualidade do ar e às consequências de eventos climáticos extremos, o que amplia as desigualdades sociais (Guia, 2024; Lima et al., 2020).

A poluição do ar causa impactos ambientais significativos, degradando a qualidade do ar, afetando a biodiversidade, contribuindo para chuvas ácidas e agravando a crise climática e o aquecimento global. O aumento de CO_2 está diretamente relacionado às mudanças climáticas,

enquanto o material particulado afeta não apenas a saúde humana, mas também os ecossistemas, alterando a composição de solos, água e vegetação, prejudicando a fotossíntese e reduzindo a produtividade das plantas. Esses efeitos destacam a importância de estratégias integradas para o controle e mitigação da poluição atmosférica. Diante de todos esses impactos, fica evidente a necessidade urgente de controlar as fontes de emissão de poluentes, monitorar a qualidade do ar e adotar medidas efetivas para proteger tanto o meio ambiente quanto a saúde da população (Sorana & Silva, 2024).

Apesar de todos os problemas relacionados a poluição do ar, o monitoramento de poluentes atmosféricos ainda é bastante restrito no Brasil, contemplando poucos municípios e limitando-se a alguns centros urbanos de maior expressão nacional, como São Paulo e Rio de Janeiro. Além disso, o monitoramento da qualidade do ar é um procedimento custoso, que exige altos investimentos financeiros, além de pessoal qualificado para as medições e organização dos dados (Seibert et al., 2022).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade do ar no município de Catanduvas e identificar possíveis fontes de emissão de poluentes por meio da utilização da técnica de biomonitoramento passivo utilizando a espécie *Ilex paraguensis* (erva-mate).

1.2.2 Objetivos específicos

- Quantificar concentração de material particulado foliar;
- Determinar a composição iônica do material particulado foliar a fim de determinar possíveis fontes de emissão;
- Analisar os parâmetros botânicos foliares de *Ilex paraguensis* a fim de avaliar a qualidade do ar;
- Analisar parâmetros físico-químicos relacionados a qualidade do solo.

1.3 JUSTIFICATIVA

Catanduvas, localizado na região oeste de Santa Catarina, apesar de ser considerado um município de pequeno porte, com população estimada em torno de 10.000 habitantes e, desta forma, se subentender menor influência antrópica sobre o ambiente, vem se desenvolvendo rapidamente nos últimos anos, principalmente em relação ao setor madeireiro, a produção de erva-mate, a produção de rações, além do setor de transporte e agricultura (Catanduvas, 2024). Essas atividades podem contribuir para a contaminação do ar, seja por meio de emissões industriais ou pela utilização

de combustíveis fósseis e práticas agrícolas que emitam poluentes atmosféricos. No entanto, informações sobre a qualidade do ar no município de Catanduvas são inexistentes.

O uso de plantas como bioindicadores da qualidade do ar é uma técnica indireta, econômica e de fácil aplicação, especialmente útil em áreas com monitoramento limitado (Cardoso et al., 2017; Cavallaro et al., 2019). Plantas respondem rapidamente às mudanças ambientais, permitindo detectar variações na poluição. A erva-mate (*Ilex paraguariensis*), com suas folhas coriáceas e perenes, é uma espécie promissora para esse uso. Com ampla ocorrência no município de Catanduvas, esta espécie oferece um método prático e acessível para avaliação indireta da qualidade do ar local. Além disso, cabe destacar que, de acordo com estudo de revisão bibliográfica realizado por Sobrinho et al. (2025) entre os anos de 2019 e 2024, muitos estudos foram realizados sobre o tema biomonitoramento utilizando plantas como indicadores da qualidade do ar, porém em nenhum deles a espécie *Ilex paraguariensis* foi utilizada.

Considerando que a qualidade do ar é um fator essencial para garantir saúde, bem-estar e sustentabilidade, discutir a poluição atmosférica torna-se fundamental no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas. A poluição do ar está diretamente relacionada a diversos ODS, especialmente o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima). A má qualidade do ar compromete a saúde humana, aumentando a incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, o que desafia os esforços para garantir uma vida saudável e promover o bem-estar de todos. Além disso, a presença de poluentes atmosféricos impacta a sustentabilidade das cidades, exigindo ações integradas de gestão urbana, mobilidade sustentável e controle de emissões. Por fim, a poluição do ar está intimamente relacionada ao agravamento das mudanças climáticas, uma vez que gases poluentes (como o CO₂) lançados na atmosfera intensificam o efeito estufa e contribuem para o aquecimento global, tornando urgente a implementação de políticas públicas que alinhem o desenvolvimento econômico à proteção ambiental e à mitigação de impactos climáticos.

1.3.1 Inserção social da pesquisa

A qualidade do ar está diretamente ligada à promoção da inserção social, pois a poluição atmosférica atinge de forma mais intensa as populações vulneráveis, como comunidades de baixa renda, moradores de áreas urbanas densamente povoadas e pessoas que vivem próximas a fontes poluidoras - inclusive em cidades de pequeno porte, onde muitas vezes faltam infraestrutura adequada e dados sobre qualidade ambiental.

Melhorar a qualidade do ar significa reduzir desigualdades socioambientais, garantir um ambiente saudável e fortalecer o exercício da cidadania. Para isso, torna-se essencial a adoção de políticas públicas eficazes, uma gestão ambiental integrada e o uso de técnicas de biomonitoramento, que permitem acompanhar a presença de poluentes de forma prática e acessível, inclusive em municípios menores com menos recursos para monitoramento convencional. Investir em tecnologias de monitoramento, estratégias de biomonitoramento e em ações educativas fortalece a participação comunitária, estimula práticas de planejamento urbano mais sustentáveis e contribui para políticas ambientais mais justas.

Assim, a melhoria da qualidade do ar, aliada a políticas públicas, gestão ambiental eficiente e ao uso do biomonitoramento, amplia a qualidade de vida, protege o meio ambiente e promove a inserção social, especialmente em comunidades e cidades de pequeno porte historicamente negligenciadas em infraestrutura e saneamento ambiental.

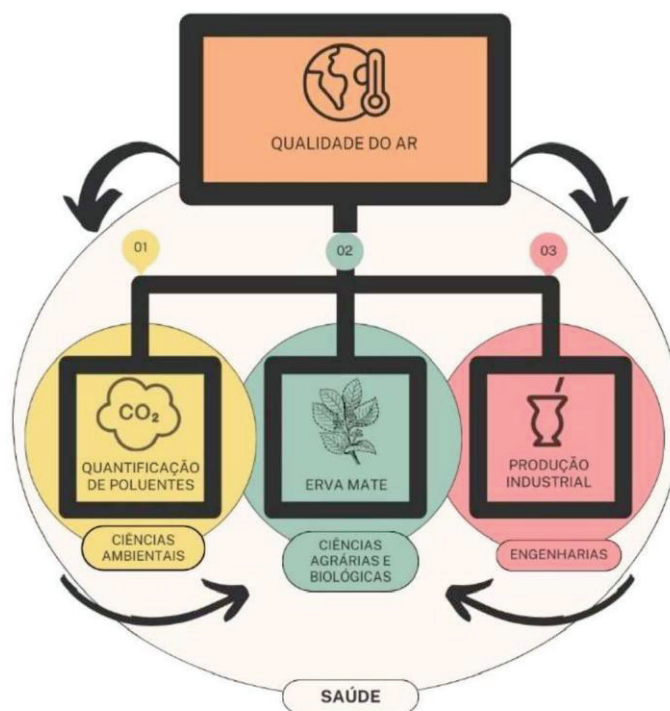
1.4 CARACTERIZAÇÃO INTERDISCIPLINAR E ADERÊNCIA AO PROGRAMA

O Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos (PPGSP), foi aprovado em 2020 na 198ª reunião do Conselho Técnico-Científico da Educação Superior (CTC-ES) da CAPES (UNIPLAC, 2021).

O programa é resultado da associação entre quatro universidades comunitárias sendo elas a UNIPLAC, UNC, UNESC e UNIVILLE e está inserido na área de avaliação interdisciplinar, especialidade Engenharia/Tecnologia/Gestão (CAPES, 2020a).

Entende-se por interdisciplinaridade a convergência de duas ou mais áreas do conhecimento, não pertencentes à mesma classe, que contribua para o avanço das fronteiras da ciência e tecnologia, transfira métodos de uma área para outra, gerando novos conhecimentos ou disciplinas. Esta dissertação é classificada como de natureza interdisciplinar, pois integra as áreas do conhecimento: Ciências Exatas e da Terra, Ciências Biológicas, Engenharia/Tecnologia, Ciências Agrárias (Figura 1). As áreas Ciências Exatas e da Terra são contempladas na dissertação por meio do tema poluição do ar e análise química do material particulado foliar. As áreas Ciências Biológicas e Ciências Agrárias estão presentes no tema de estudo em função da espécie botânica a ser estudada, análises botânicas, bem como por meio do estudo relacionado as condições atmosféricas locais e características geográficas da região. A área de conhecimento Engenharia/Tecnologia se faz presente neste estudo por meio da análise das possíveis fontes de emissão (sistemas produtivos locais e regionais) de poluentes atmosféricos.

Figura 1
Representação da interdisciplinaridade envolvida no projeto de dissertação



Fonte: A autora.

O Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP, tem o intuito de desenvolver formas inovadoras e sustentáveis de gerenciamento nos mais diversos segmentos que fornecem produtos e serviços.

Esta dissertação possui aderência à linha de pesquisa 2– Sistemas Produtivos e Sustentabilidade, pois objetiva investigar sistemas produtivos por meio do conhecimento técnico e científico levando em consideração especialmente aspectos ambientais, a fim de garantir a qualidade ambiental e qualidade de vida da população da região em estudo.

1.5 ESTRUTURA GERAL DO DOCUMENTO

A dissertação foi organizada em seções que abordaram a introdução, revisão da literatura, metodologia, resultados, discussão e conclusão. Cada parte apresentou, respectivamente, o tema e objetivos, o embasamento teórico, os métodos utilizados, os dados coletados, a análise dos resultados e as principais conclusões do estudo.

2 PANORAMA TEÓRICO

2.1 POLUIÇÃO AMBIENTAL

A palavra poluição vem do termo em latim *polluere*. Em termos de significado metafórico, a palavra *polluere* está ligada principalmente a valores morais – manchar a fama ou profanar o sagrado, violar leis. Além da conotação moral, existe uma conotação física deste termo, que significa sujar, manchar, alterar negativamente o meio ambiente. Desde a Antiguidade, as sociedades relacionaram-se com o meio em que habitavam buscando principalmente abrigo, insumos (alimentares, dessedentação, energia) e locais para depositar seus resíduos. Em geral, toda alteração ocorrida no meio ambiente que cause desequilíbrio e prejudique as atividades humanas e a biota pode ser considerada um impacto ambiental (F. S. Dos Santos et al., 2019).

Após a revolução industrial, o ser humano começou a manipular substâncias altamente tóxicas, ou mesmo a produzir materiais sintéticos e rejeitos contaminados de seus sistemas produtivos. O crescimento acelerado da indústria e produção de bens de consumo não foi acompanhado por uma gestão adequada desses materiais, bem como do controle de risco, já que acidentes poderiam levar a grandes impactos. Efeitos como chuva ácida, ilhas de calor, efeito estufa, aumento da incidência de doenças como o câncer por exemplo, e geração de toneladas de resíduos perigosos e descartados inadequadamente, são algumas das consequências do setor industrial que ocorreram e ainda ocorrem frequentemente em todo o mundo (Reis, 2014).

A humanidade desfruta hoje de muitas vantagens oriundas do avanço tecnológico alcançado nas últimas décadas em diversos campos. Contudo, este avanço somado ao rápido crescimento da população mundial tem deixado um rastro de prejuízos ambientais, especialmente devido à falsa ideia inicial de que os recursos naturais eram abundantes e inesgotáveis. Assim, torna-se cada vez mais urgente transformar este cenário, por exemplo, por meio de ações de maior sustentabilidade, como deixando cada vez mais de lado o modelo capitalista inicialmente adotado, o qual evidenciava a preocupação excessiva com o lucro em detrimento da preservação dos recursos naturais. Observa-se nos últimos anos uma mudança lenta, mas gradual, em termos de conscientização ambiental da população e das indústrias. Observa-se que a legislação sobre os recursos naturais a cada ano torna-se mais rígida, com uma pressão crescente para que a terra, a água e o ar sejam preservados. O cenário está mudando, e alguns processos podem ser revertidos, mas ainda há muito a ser feito, especialmente por meio de pesquisas científicas (Bruno, 2005; Guia, 2024; Lima et al., 2020).

2.2 POLUIÇÃO DO AR

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, NBR 8969:1985, a poluição do ar, ou atmosférica, consiste na alteração da composição ou das propriedades do ar por toda e qualquer forma de matéria e/ou energia estranha ou não inerente a sua composição normal que possa ou venha a causar: danos à saúde, fauna, flora e materiais; prejuízo à segurança, ao uso e ao gozo da propriedade, à economia e ao bem-estar da comunidade. Assim, a poluição atmosférica se caracteriza como uma acentuação ou incremento nos níveis normais de espécies químicas normalmente presentes na composição do ar capazes de atingir concentrações nocivas ao meio ambiente (Reis, 2014).

O tema poluição do ar sempre despertou interesse, porém foi a partir do evento extremo, nevoeiro, observado em Londres no ano de 1952, que causou a morte de aproximadamente 12 mil pessoas, que gestores públicos e legisladores realmente começaram a se preocupar sobre os efeitos adversos da poluição do ar sobre a saúde humana. Neste período, observa-se o desenvolvimento de políticas e legislações importantes como o *Clean Air Act*, promulgado nos Estados Unidos em 1963 (EPA, 1990). No Brasil, em 1989, criou-se o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (Pronar) pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, sendo este um dos instrumentos básicos de gestão ambiental para “proteção da saúde e bem-estar das populações com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do país de forma ambientalmente segura” (Vormittag et al., 2021).

O ar é considerado um dos compartimentos ambientais mais sensível aos fenômenos de poluição antrópica, especialmente os fenômenos observados em áreas urbanas, consequência da crescente queima de combustíveis fósseis, tráfego intenso, lançamento de efluentes industriais atmosféricos, queimadas urbanas, dentre outros (Marques Torres et al., 2020). Segundo a Organização Mundial de Saúde, a exposição ao ar poluído está entre as principais causas de câncer de pulmão, asma, outras doenças respiratórias crônicas. Anualmente são registradas 7 milhões de mortes prematuras devido à má qualidade do ar que se respira. Isso significa que uma em cada oito mortes no mundo está relacionada à exposição ao ar contaminado (OMS, 2017). Assim, a poluição do ar está intimamente associada à graves problemas de saúde pública relacionados à diversos tipos de doenças respiratórias, especialmente observadas em crianças e idosos, e em casos extremos, crises cardíacas e derrames, assim como abortos espontâneos (mortes prematuras). A poluição do ar deixou de ser um problema meramente ambiental e é, atualmente, considerada um grave problema de saúde pública (G. S. Dos Santos et al., 2019; J. M. Santos et al., 2022; Schaidhauer et al., 2024).

Os altos índices de poluição atmosférica causam não somente prejuízos a população local, em termos de saúde, mas também geram impactos negativos no panorama econômico e social da

comunidade, por exemplo, queda de produtividade agrícola e maior vulnerabilidade das populações carentes frente aos crescentes e intensos efeitos climáticos. Assim, é evidente a urgência em se abordar este problema, levando em consideração tanto a química da atmosfera quanto as fontes de poluição e seus efeitos prejudiciais (Guia, 2024; Lima et al., 2020).

2.3 POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A Resolução CONAMA nº 506/2024 define como poluente atmosférico qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que 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 e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade. Os poluentes atmosféricos podem ser de origem natural (vulcões, processos microbiológicos no solo, decomposição de matéria orgânica, queimadas de origem natural etc.) ou de origem antropogênica (combustão industrial, transportes, geração de energia, queimadas antropogênicas etc.) (Brito et al., 2018; Cardoso et al., 2017; Lima et al., 2020).

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados em primários e secundários de acordo com sua forma de emissão e formação. Os poluentes primários são aqueles lançados diretamente na atmosfera por atividades humanas ou naturais, como o dióxido de enxofre (SO_2), o dióxido de nitrogênio (NO_2), o monóxido de carbono (CO) e o material particulado (PM), provenientes de queima de combustíveis fósseis, processos industriais e emissões veiculares. Já os poluentes secundários são formados na atmosfera a partir de reações químicas envolvendo poluentes primários e componentes do ar, sendo exemplos típicos o ozônio troposférico (O_3) e os nitratos e sulfatos presentes em partículas finas, que se originam da transformação de NO_2 e SO_2 . Ambos os tipos de poluentes contribuem para problemas ambientais e de saúde pública, como poluição do ar, chuvas ácidas, alterações climáticas e doenças respiratórias, evidenciando a necessidade de estratégias integradas de monitoramento e controle das emissões (Brito et al., 2018; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA, 2024; Reis, 2014).

A medição sistemática da qualidade do ar é restrita a um número de poluentes, definidos em razão de sua importância e dos recursos disponíveis para seu acompanhamento. O grupo de poluentes que servem como indicadores da qualidade do ar, adotados universalmente e que foram escolhidos em razão da frequência de ocorrência e de seus efeitos adversos, segundo o Ministério do Meio Ambiente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA, 2024), são:

- material particulado: é uma mistura complexa de sólidos com diâmetro reduzido, cujos componentes apresentam características físicas e químicas diversas. Em geral o material particulado é classificado de acordo com o diâmetro das partículas, devido à relação existente entre diâmetro e possibilidade

de penetração no trato respiratório. As classificações incluem (a) *partículas totais em suspensão (PTS)*: partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 50 \mu\text{m}$; podem ser inaláveis e causar problemas de saúde ou afetar a qualidade de vida e estética ambiental; (b) *partículas inaláveis (MP_{10})*: partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 10 \mu\text{m}$; podem se depositar na parte superior do sistema respiratório ou alcançar os alvéolos pulmonares; (c) *partículas inaláveis finas ($MP_{2,5}$)*: partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 2,5 \mu\text{m}$; penetram profundamente no sistema respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares. As fontes principais de material particulado são a queima de combustíveis fósseis, queima de biomassa vegetal, emissões de amônia na agricultura e emissões decorrentes de obras e pavimentação de vias.

- Monóxido de carbono (CO): é um gás inodoro e incolor, formado no processo de queima de combustíveis. É emitido nos processos de combustão que ocorrem em condições não ideais, em que não há oxigênio suficiente para realizar a queima completa do combustível. A maior parte das emissões em áreas urbanas são decorrentes dos veículos automotores.

- Dióxido de enxofre (SO_2): é um gás tóxico e incolor, pode ser emitido por fontes naturais ou por fontes antropogênicas e pode reagir com outros compostos na atmosfera, formando material particulado de diâmetro reduzido. Fontes naturais, como vulcões, contribuem para o aumento das concentrações de SO_2 no ambiente, porém na maior parte das áreas urbanas as atividades humanas são as principais fontes emissoras. A emissão antropogênica é causada pela queima de combustíveis fósseis que contenham enxofre em sua composição. As atividades de geração de energia, uso veicular e aquecimento doméstico são as que apresentam emissões mais significativas.

- Óxidos de nitrogênio (NOx): é um gás poluente com ação altamente oxidante, sua presença na atmosfera é fator chave na formação do ozônio troposférico. Além de efeitos sobre a saúde humana apresenta também efeitos sobre as mudanças climáticas globais. As fontes podem ser naturais (vulcanismos, ações bacterianas, descargas elétricas) e antropogênicas (processos de combustão em fontes móveis e fixas).

- Ozônio (O_3): é um poluente secundário, ou seja, não é emitido diretamente, mas formado a partir de outros poluentes atmosféricos, e altamente oxidante na troposfera (camada inferior da atmosfera). O ozônio é encontrado naturalmente na estratosfera (camada situada entre 15 e 50 km de altitude), onde tem a função positiva de absorver radiação solar, impedindo que grande parte dos raios ultravioletas cheguem a superfície terrestre. A formação do ozônio troposférico ocorre através de reações químicas complexas que acontecem entre o dióxido de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, na presença de radiação solar. Estes poluentes são emitidos principalmente na queima de combustíveis fósseis, volatilização de combustíveis, criação de animais e na agricultura.

O monitoramento da qualidade do ar é uma medida fundamental, gerando dados sobre as condições atuais da qualidade do ar, construindo um histórico de informações e capacitando os tomadores de decisão a planejar ações e políticas públicas que visem assegurar boa qualidade do ar e qualidade de vida da população (Vormittag et al., 2021). É essencial realizar o monitoramento e o controle de emissão de poluentes atmosféricos com medidas que incluam a implementação de tecnologias de controle de poluição, regulamentação mais rigorosa, promoção do uso de energias renováveis e incentivo ao uso de transporte público e veículos elétricos (Amaral, 2021; Guia, 2024; Santos et al., 2022).

2.4 BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO AR

Bioindicadores são organismos ou grupos de organismos cuja presença, abundância e condições refletem o estado de determinado fator ambiental, como qualidade do ar, água ou solo. Eles servem como indicadores biológicos de condições ambientais específicas, permitindo avaliar a saúde de ecossistemas e detectar alterações causadas por fatores naturais ou antrópicos. A poluição atmosférica pode causar diversas consequências para a vegetação, como eliminação de espécies mais sensíveis — reduzindo a biodiversidade —, diminuição no crescimento e aumento na vulnerabilidade a pragas e doenças. A deposição de material particulado sobre as folhas pode interceptar a luz que atinge a superfície foliar, reduzindo o processo de fotossíntese (Schaidhauer et al., 2024). Nesse contexto, as plantas podem ser usadas como indicadoras de reação, que respondem aos poluentes com deformações anatômicas visíveis, ou como indicadoras de acumulação, sendo mais resistentes e capazes de reter poluentes nos tecidos foliares para análises químicas (Cardoso et al., 2017).

A utilização de plantas nativas no biomonitoramento da qualidade do ar revela-se uma ferramenta eficiente, de baixo custo e com boa representatividade local. Isso porque a vegetação nativa pode acumular, transformar e absorver poluentes, funcionando como um indicador confiável da presença de substâncias prejudiciais à saúde humana e ao ambiente. Duas estratégias complementares dentro do biomonitoramento são amplamente utilizadas: o biomonitoramento passivo e o biomonitoramento ativo. O biomonitoramento passivo baseia-se no uso de organismos naturalmente presentes no ambiente a ser investigado— como líquens, briófitas e espécies arbóreas — e analisa-se suas respostas fisiológicas, morfológicas ou acúmulo de poluentes (baixo custo e histórico de exposição, mas sensível a variáveis ambientais). Espécies nativas presentes na região de estudo podem ser consideradas tanto indicadoras da qualidade do ar como organismos capazes de minimizar a concentração de material particulado, por meio de sua deposição em estruturas como as folhas (Cavallaro et al., 2019). O biomonitoramento ativo envolve a exposição controlada de organismos previamente selecionados — por exemplo, o transplante de líquens ou o uso de plantas

em vasos, como *Nicotiana tabacum*, sensível ao ozônio— o que permite padronização para comparações entre locais ou períodos, mas exige maior esforço logístico e tende a representar apenas exposições pontuais.

Em estudo de bibliometria realizado por Sobrinho et al (2025), sobre o uso de espécies de plantas com indicadores da qualidade do ar, foi identificado o uso de 52 espécies no período de 2019 e 2024. Embora todas as partes das plantas possam ser empregadas nesse tipo de estudo, as folhas se destacaram como o principal órgão analisado, sendo avaliadas quanto a alterações morfológicas, bioquímicas, fisiológicas e, principalmente, à capacidade de acumulação de material particulado e metais traço. Essas espécies funcionam como bioindicadores eficazes para identificação dos principais poluentes responsáveis pela degradação da qualidade do ar e pelos impactos à saúde humana e aos ecossistemas.

2.5 ESTUDOS RELACIONADOS AO BIOMONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

Muitos pesquisadores têm se dedicado ao uso da técnica do biomonitoramento passivo para estudos relacionados a qualidade do ar. G. S. Dos Santos et al., (2019) realizaram estudo na cidade de Joinville/SC, por meio da análise de concentração do material particulado foliar coletado de folhas de *Alchornea glandulosa*, popularmente conhecida como tamanqueiro, tapiá ou amor seco, uma espécie de árvore da família das euforbiáceas, nativa da América do Sul, presente em diferentes regiões da cidade. Os autores observaram maior quantidade de material particulado depositado sobre as folhas dos indivíduos em zona de classificação urbana/industrial ($0,0001$ a $0,0031$ mg/cm²), bem como evidente redução da área foliar, conteúdo de água e tecidos fotossintetizantes nas folhas dos indivíduos presentes no ponto com maior concentração de material particulado. A área específica foliar mostrou que os indivíduos do ponto controle investem mais em produção fotossintética, enquanto os indivíduos do ponto mais poluído investem na manutenção da folha. Cavallaro et al (2019), em estudo na cidade de Joinville/SC, utilizando a espécie *Inga edulis*; uma espécie de ingá originária da Amazônia podendo alcançar até 15 m de altura, encontrou concentração de material particulado foliar variando de $0,18$ a $0,29$ mg/cm² e menores valores de atributos foliares em indivíduos também localizados em zona urbana/industrial. Mais especificamente maiores valores para massa fresca foram observados ponto controle (área rural), sendo este 61% superior ao observado em plantas localizadas em área urbana. Reis (2014), quantificou a concentração de material particulado foliar sobre a espécie *Pachira aquatica*; uma árvore da família Malvaceae ou Bombacaceae, nativa da América Central e do Sul, conhecida vulgarmente como munguba, castanhola e mamorana. Este estudo foi realizado na cidade de Goiânia e o autor encontrou valores de material particulado foliar variando de $0,014$ a $0,871$ mg/cm², sendo os maiores valores obtidos de pontos de

coleta próximos à região de intenso tráfego de veículos. Cardoso et al.(2017), observaram também maior concentração de material particulado foliar (aproximadamente 2 vezes superior), utilizando as espécies amendoeira, sibipiruna e pata-de-vaca, em regiões de maior tráfego de veículos, comércio e indústrias de pequeno porte que em regiões de menor influência antrópica como o campus da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), situada em área com trânsito de veículos e atividades antrópicas moderados.

Xu et al., (2019) quantificaram a concentração de material particulado foliar grosso (menor que 10 μm de diâmetro), fino (2,5 a 10 μm) e muito fino (0,2 a 2,5 μm), em 17 espécies de árvores em diferentes regiões de Pequim, China, e obtiveram valores de concentração de material particulado foliar (soma das três frações) variando de 0,010 a 0,050 mg/cm^2 . As concentrações de material particulado ultra fino e fino foram menores que a de material particulado grosso (em torno de 80% da massa total); sendo os valores médio de material particulado fino e ultra fino iguais a 0,004 e 0,0025 mg/cm^2 , respectivamente. Freer-Smith et al., (2005), realizaram estudo similar na cidade de Londres, Inglaterra, e obtiveram valores médios de material particulado foliar grosso (maior que 20 μm de diâmetro), fino (0,45 a 20 μm) e muito fino (0,02 a 0,45 μm) iguais a 0,05 e 0,025 mg/cm^2 (soma das frações fina e ultrafina).

Bonatti-Chaves et al., (2024), demonstraram os efeitos dos ambientes urbano-industriais sobre a morfologia de *Nectandra oppositifolia*, além de alterações na diversidade de líquens e na composição de pólen de abelhas, confirmando a abrangência dos impactos ambientais sobre diferentes organismos e níveis tróficos. Schaidhauer et al., (2024), em estudo realizado na cidade de Joinville/SC avaliou a integração de dados ambientais, fisiológicos e clínicos sob a perspectiva da Saúde Única (*One Health*). Os autores identificaram alterações morfofisiológicas em *Piper gaudichaudianum* e distúrbios cardiovasculares em trabalhadores expostos a poluentes industriais, demonstrando o impacto simultâneo da poluição sobre a vegetação e a saúde humana. Elementos como ferro, alumínio e silício foram encontrados em níveis elevados no material particulado foliar, com efeitos histológicos detectáveis nas plantas e em exames clínicos humanos (por exemplo, alterações cardiovasculares). Os autores comprovaram que os efeitos da poluição atmosférica vão além dos impactos ecológicos e afetam diretamente a saúde pública. Em estudo realizado na cidade de Lucca, Itália, em uma região caracterizada pela presença de diversas fontes de emissão de poluentes, Baesso Moura et al., (2024) observaram concentrações de material particulado foliar superiores a 50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, especialmente nas espécies *Euonymus japonicus*, *Ligustrum lucidum*, *Alnus glutinosa*, *Rubus ulmifolius* e *Laurus nobilis*. Além disso, os autores investigaram a correlação entre características foliares— como área foliar específica (SLA), área foliar (LA) e arredondamento da folha - e a concentração de material particulado foliar em 30 espécies vegetais diferentes. A análise de regressão linear múltipla indicou que essas

características influenciam significativamente a deposição de material particulado, sendo que SLA e LA apresentaram correlação negativa, enquanto o arredondamento da folha apresentou correlação positiva. Os autores destacam a importância de selecionar espécies vegetais com características foliares específicas para melhorar a qualidade do ar em ambientes urbanos, sobretudo em áreas altamente poluídas, contribuindo para a saúde pública e a sustentabilidade ambiental. Em estudo realizado na Polônia por Popek et al., (2025), foi avaliada a eficácia de barreiras de vegetação mista na mitigação da poluição do ar ao longo de três tipos de vias: rodovia, urbana e suburbana. Os autores analisaram a concentração de material particulado foliar em três faixas de tamanho (10 - 100, 2,5 - 10 e 0,2 - 2,5 μm), e a espécie *Tilia cordata* como bioindicadora da qualidade do ar. Além da concentração do material particulado foliar, também foram determinadas as concentrações de elementos-traço (TEs) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Os resultados mostraram que os arbustos capturaram até 12% mais material particulado do que as árvores e que as barreiras vegetais reduziram em cerca de 50% a concentração do material particulado de maior tamanho, especialmente em áreas de rodovia. As concentrações de TEs e HAPs foram mais elevadas próximas a vias com tráfego intenso, apresentando redução progressiva em regiões menos poluídas. Baseado nos resultados, os autores destacam a importância da seleção estratégica de espécies vegetais, bem como da composição e do design das barreiras, em iniciativas de arborização urbana voltadas ao combate da poluição atmosférica, à promoção da saúde pública e ao fortalecimento da resiliência ecológica.

2.6 IDENTIFICAÇÃO DE POSSÍVEIS FONTES DE EMISSÃO

As fontes de poluição atmosférica são múltiplas, incluindo emissões veiculares, industriais, queima de biomassa, uso de fertilizantes e fatores meteorológicos. Gemelli et al. (2024), realizaram estudo sobre fontes de poluentes fixas e móveis no município de Brusque em virtude da problemática ambiental relacionada à poluição atmosférica. A análise permitiu evidenciar que as fontes fixas (indústrias) e as fontes móveis (veículos), destacam-se enquanto expressivas fontes emissoras de poluentes atmosféricos no município. A Organização Mundial de Saúde (OMS) lista como principais fontes artificiais de poluição do ar os modelos ineficientes de transporte, a queima de combustível doméstico e resíduos, usinas de energia movidas a carvão e atividades industriais em geral (OMS, 2017).

Estudos relacionados a identificação de possíveis fontes de emissão de poluentes, estão relacionados ao estudo da composição química do material particulado. A emissão de material particulado e gases como óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2) resulta, majoritariamente, da queima de combustíveis fósseis, atividade industrial e tráfego de veículos (Reis, 2014). Esses poluentes podem sofrer reações atmosféricas, originando compostos secundários como

sulfatos e nitratos, que são encontrados aderidos à superfície de folhas e em aerossóis atmosféricos. Atividades como a agrícola (via fertilizantes) e a queima de biomassa são importantes fontes de emissão de compostos nitrogenados e sulfurados (Ávila, 2010).

Freitas & Solci (2009), estudaram a composição química do material particulado de diferentes tamanhos, coletado em duas áreas de Londrina, uma urbana e outra rural. O íon sulfato foi encontrado em maior concentração no material particulado no ambiente urbano e em menor concentração no ambiente rural, comparado aos ânions nitrato e cloreto. Os autores sugerem que as fontes de sulfato no material particulado urbano são de origem antrópica provenientes de emissões diretas da exaustão de veículos, principalmente da queima do diesel. No ambiente urbano ocorreu a maior concentração de sulfato comparada à do meio rural, onde a influência de emissão veicular é insignificante. O nitrato foi encontrado em maior concentração no ambiente rural, comparado aos outros ânions. A queima de combustíveis fósseis no ambiente urbano é apontada como principal causa das emissões de partículas contendo nitrato, enquanto a emissão de NO_x dos solos e a queima de biomassa são os possíveis responsáveis pela presença do nitrato no meio rural. As partículas de menor diâmetro contendo cloreto podem ser resultantes de processos recentes de formação como emissões de combustão (lixo, biomassa), enquanto as partículas grossas, em predominância nos ambientes rural e urbano, podem ser originadas de reações secundárias como ainda procedentes da ressuspensão de solo.

Em estudo realizado por Beringui et al. (2021), com amostras coletadas no Estado do Rio de Janeiro, e utilizado técnicas espectrométricas para determinação elementar e de cromatografia para determinação de íons, espécies solúveis em água, os autores observaram que a fração solúvel do material particulado era composta majoritariamente pelos ânions NO_3^- e SO_4^{2-} , que são traçadores de emissões veiculares. A avaliação da contribuição marinha para a composição iônica do material particulado mostrou que em grande parte dos íons Ca^{2+} , K^+ e SO_4^{2-} apresentaram maior contribuição do que outras fontes, enquanto Mg^{2+} é majoritariamente proveniente do mar. A estimativa do grau de neutralização no material particulado mostrou que, na maioria dos estudos nos quais as espécies solúveis foram quantificadas, as partículas possuíam caráter ácido, o que pode ser atribuído às altas concentrações dos íons provenientes de ácidos fortes, NO_3^- e SO_4^{2-} . Isso indica a possibilidade de ocorrência de chuva ácida nos locais monitorados, o que representa um risco para a população, ecossistemas, monumentos e o meio ambiente como um todo. Em estudo realizado por Tepanosyan et al., (2021) em duas grandes áreas urbanas da Armênia observou-se altos teores de metais traço (elementos potencialmente tóxicos) tanto nas amostras de solo quanto nas amostras de material particulado depositado nas folhas das espécies arbóreas estudadas. Os autores observaram valores mais altos especialmente em locais próximos a fontes de poluição localizadas e ativas (como unidades

industriais e áreas de tráfego intenso), identificadas por elementos-traço característicos deste tipo de atividade antrópica - como Mo (molibdênio), Cu (cobre), Zn (zinco), Pb (chumbo) e Cd (cádmio). Os autores concluem que o uso da técnica de biomonitoramento passivo foi eficiente como ferramenta de biomonitoramento de elementos potencialmente tóxicos e identificação de fontes de poluição. Em estudo realizado na Índia por Gajbhiye et al., (2022), foram analisadas duas espécies de árvores — *Senna siamea* e *Alstonia scholaris* — em seis áreas de amostragem: duas residenciais, uma com intenso tráfego de veículos, uma comercial, uma industrial e uma área controle (com menor influência antrópica). Os autores observaram que as maiores concentrações dos metais tóxicos Pb, Cd e Cu, obtidas a partir do material particulado foliar, ocorreram na área de amostragem 4, seguida das áreas 6, 5, 3, 2 e 1. A área 4, caracterizada pela alta densidade de tráfego, apresentou os níveis mais elevados de contaminação, enquanto a área 6, de perfil industrial, foi identificada como o segundo ponto mais poluído. Já a área 5 apresentou contaminação moderada, e as áreas 2 e 3, de uso residencial, exibiram concentrações intermediárias. A área 1, designada como controle, apresentou as menores concentrações de metais, refletindo um impacto antrópico mínimo. As altas concentrações registradas entre as áreas 6 e 2, comprovadas pelo cálculo do fator de enriquecimento, indicam a origem antrópica do material particulado foliar, associada principalmente às emissões veiculares, à industrialização e às usinas termelétricas. Estudo realizado por Miranda (2023), na cidade de Jaraguá do Sul (SC), utilizando o material particulado depositado sobre folhas de *Schinus terebinthifolia*, aroeira-vermelha, como espécie bioindicadora, mostrou valores de pH, para as amostras provenientes da área rural e urbana variando de 6,7 a 6,4 e valores de condutividade, para a área urbana em torno de 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$; e para a área rural amostras com valores de condutividade em torno de 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sugerindo maior concentração de íons solúveis na área urbana. Os valores de concentração de cloreto variaram de 0,4 a 10,0 mg de Cl^-/mg de material particulado foliar e os valores de concentração de sulfato variaram de 0,4 a 0,6 mg de $\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}$ de material particulado foliar. Com relação a presença do ânion sulfato nos extratos aquosos das folhas de aroeira, pode-se sugerir como origem a precipitação de SO_x atmosférico devido a reação deste com vapor de água presente na atmosfera, sendo as principais fontes de emissão de gases SO_x a queima de combustíveis fósseis (em termelétricas, processos industriais, tráfego de veículos, etc.) e produções a partir de sulfetos orgânicos. A presença de íons cloreto no extrato aquoso também sugere como possível fonte de emissão a queima de combustíveis fósseis; porém, da mesma forma, pode sinalizar como possível fonte de emissão de material particulado a queima de lixo contendo compostos clorados, como poli(cloreto de vinila) PVC, e biomassa.

2.7 DISPERSÃO DO MATERIAL PARTICULADO FOLIAR

Quanto a dispersão ou diluição dos poluentes, que consiste na mistura dos poluentes com ar limpo, normalmente oriundo de camadas superiores da atmosfera, tem-se como principais fatores influenciadores (a) a velocidade do vento: contribui para a mistura dos poluentes com o ar limpo, sendo que em condições de pouco vento, a diluição torna-se um processo lento; (b) relevo: formação dos ventos depende das condições meteorológicas e também dos obstáculos que este encontrará na superfície da Terra, ou seja, construções, prédios, montanhas etc., podendo estes contribuírem também para a diminuição da velocidade do vento; (c) estabilidade atmosférica: o movimento vertical do ar sofre influência direta das condições de estabilidade da atmosfera. Convecção e turbulência são intensificadas quando o ar é instável e inibidas, quando o ar é estável; (d) profundidade de mistura: é a distância vertical entre a superfície da Terra e a altitude das correntes de convecção. Quando a mistura em profundidade é grande (muitos quilômetros, por exemplo), observamos uma grande quantidade de ar limpo misturada com poucas quantidades de poluentes; (e) inversão de temperatura: normalmente, o ar vai esfriando com o aumento da altitude. Em geral, ao longo do dia, o ar frio tende a descer e o ar quente tende a subir, criando correntes de convecção que renovam o ar junto ao solo. Em algumas ocasiões e locais (especialmente junto a encostas de montanhas ou em vales), ocorre uma inversão: uma camada de ar frio se interpõe entre duas camadas de ar quente, evitando que as correntes de convecção se formem. Dessa forma, o ar junto ao solo fica estagnado e não sofre renovação; (f) chuva: a chuva é responsável pela remoção de muitos poluentes da atmosfera. Partículas suspensas no ar adsorvem as gotículas de chuva e são removidas da atmosfera pela precipitação (J. M. Santos et al., 2022; Sorana & Silva, 2024).

As condições meteorológicas podem também ser associadas a efeitos de dispersão de poluentes atmosféricos. Em situações de prevalência de fatores como ventos fracos e inversões térmicas, comuns no inverno, observa-se o aprisionamento do ar poluído no local e conseqüentemente aumento no número de doenças respiratórias na população. Assim como em condições de baixa umidade do ar, também normalmente observada nas estações mais frias do ano, e juntamente com alta concentração de poluentes, observa-se maior incidência de complicações respiratórias na população (Sorana & Silva, 2024).

O referencial teórico construído a partir de estudos relacionados ao biomonitoramento da qualidade do ar evidencia a complexidade das interações entre fontes de emissão, dispersão atmosférica e seus efeitos sobre organismos vivos. A utilização de bioindicadores vegetais, juntamente com a análise química do material particulado, permite mapear áreas críticas e implementar ações preventivas para minimizar os efeitos da poluição atmosférica sobre a saúde e o

ambiente. Por fim, a integração entre ciência, planejamento urbano e políticas públicas faz-se necessária para garantir ações coordenadas de monitoramento e controle da poluição atmosférica.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

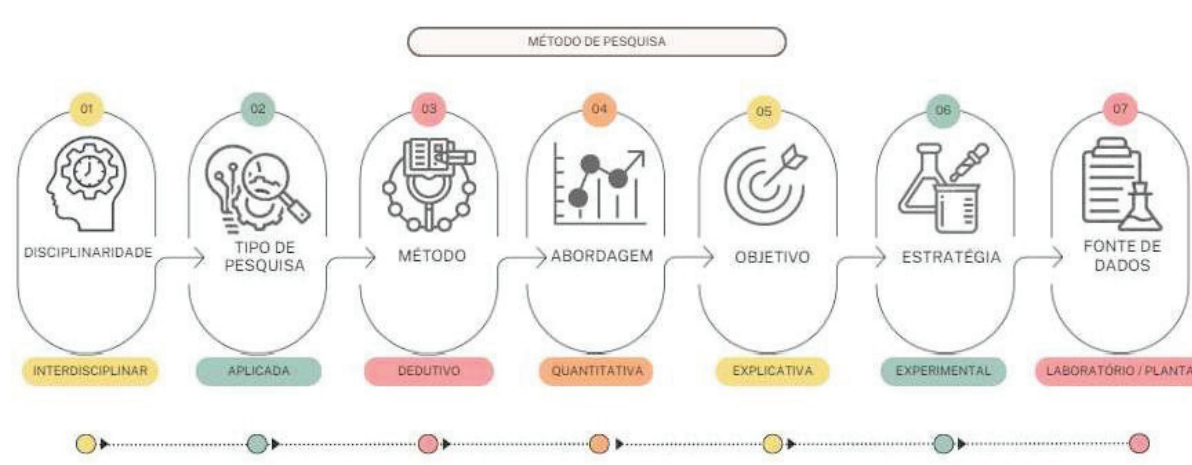
O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, pois busca investigar um fenômeno local —a qualidade do ar no município de Catanduvas—com o objetivo de fornecer informações que possam subsidiar políticas públicas e estratégias de gestão ambiental. As pesquisas aplicadas têm como foco a resolução de problemas específicos da sociedade, utilizando procedimentos e técnicas que gerem informações úteis para diferentes finalidades, como a formulação de políticas ou a administração de fenômenos complexos (Gil, 2022). O método dedutivo foi adotado, partindo de conceitos teóricos previamente estabelecidos na literatura científica para guiar as análises realizadas. Esse método permite aplicar princípios gerais para compreender fenômenos específicos, como avaliação da qualidade do ar por meio da técnica de biomonitoramento passivo. A abordagem do estudo é predominantemente quantitativa, baseando-se em medições objetivas, como análises físico-químicas, a fim de fornecer resultados mensuráveis e confiáveis. A pesquisa quantitativa é ideal para estabelecer relações entre variáveis e garantir maior rigor na análise dos dados coletados (Sampieri et al., 2013).

Os objetivos da pesquisa são explicativos, buscando não apenas descrever o fenômeno, mas também compreender relações de causa e efeito, como o estudo de possíveis fontes de emissão e a composição química do material particulado foliar. Pesquisas explicativas têm como foco o aprofundamento da compreensão dos fenômenos estudados e a determinação de fatores que contribuem para a sua ocorrência (Gil, 2022). A estratégia adotada foi experimental, uma vez que as análises foram realizadas em laboratório utilizando procedimentos específicos, como pesagens, processos de extração e métodos cromatográficos espectroscópicos para avaliação de parâmetros botânicos e quantificação de espécies químicas. Esse tipo de estratégia é essencial para validar a metodologia proposta e verificar sua aplicabilidade prática.

As fontes de dados utilizadas neste estudo foram constituídas por folhas coletadas em diferentes áreas do município de Catanduvas, as quais atuaram como matriz para a deposição de material particulado e foram posteriormente submetidas a análises laboratoriais. A utilização de fontes de dados experimentais é essencial para gerar evidências que fundamentem conclusões e subsidiem o monitoramento ambiental (Sampieri et al., 2013). Nesse contexto, as técnicas de pesquisa empregadas envolveram experimentos em laboratório a partir de amostras coletadas em ambiente externo, incluindo folhas de árvores, amostras de solo e material particulado sólido depositado sobre a superfície foliar.

A Figura 2 ilustra a caracterização da pesquisa quanto disciplinaridade, tipo de pesquisa, método, abordagem, objetivo, estratégia e fonte de dados.

Figura 2
Classificação da pesquisa



Fonte: A autora.

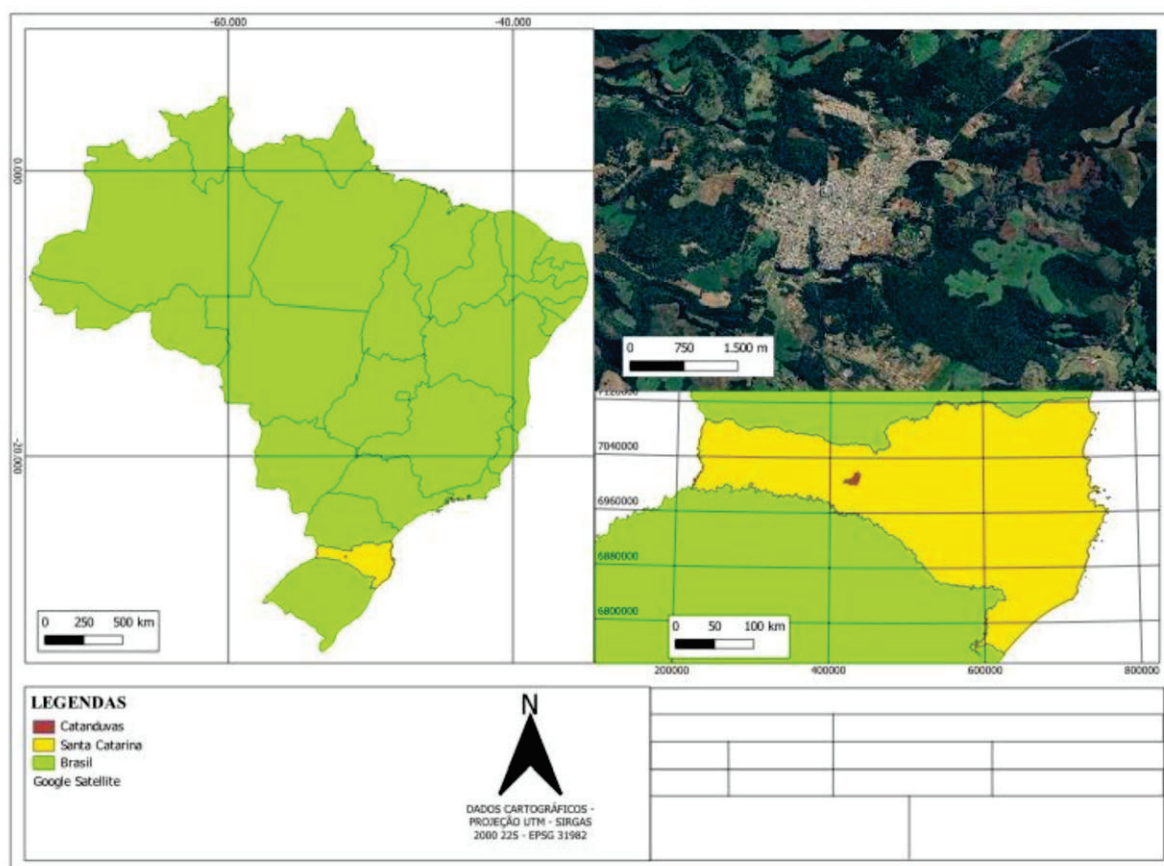
3.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Nos itens seguintes encontram-se descritos a delimitação do estudo.

3.2.1 Descrição do local e população em estudo

O local de estudo é o município de Catanduvas, situado na região Oeste do Estado de Santa Catarina, Brasil, às coordenadas geográficas 27°04'14" de latitude sul e 51°39'42" de longitude oeste (Figura 3). De acordo com o último censo, realizado em 2022, sua população é de 10.566 habitantes, área territorial de 199,166 km² e densidade demográfica 53,05 habitantes/km². Área urbanizada de 4,61 km² com percentual de arborização de vias públicas igual a 46,8 % (IBGE, 2022). O clima segundo a classificação de Kopper é mesotérmico úmido, caracterizado por temperaturas amenas e chuvas bem distribuídas ao longo do ano. A temperatura média anual é de 16,9 °C, como consequência do clima e do relevo (Catanduvas, 2024). O município de Catanduvas está localizado a 945m acima do 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.

Figura 3
Local de estudo, município de Catanduvas, SC, Brasil

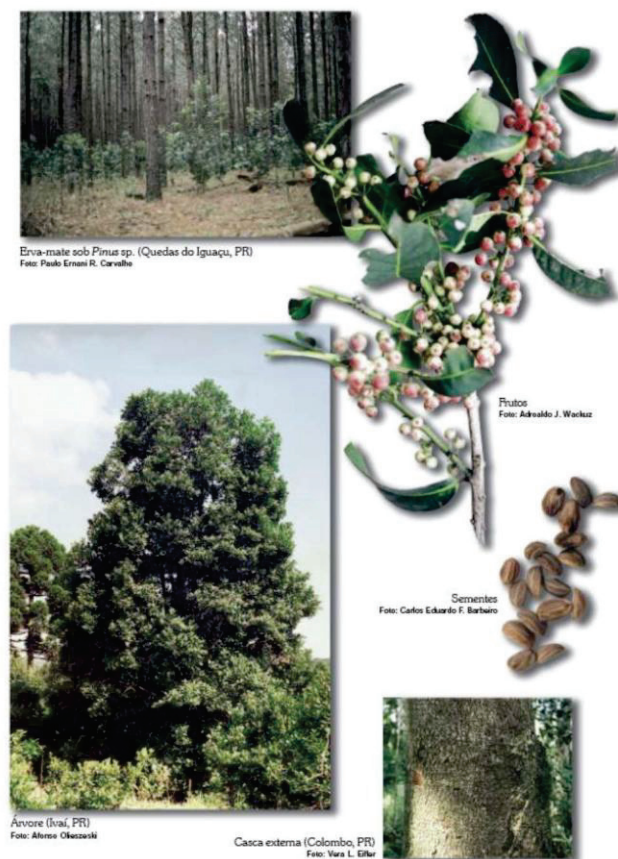


Fonte: A autora.

Como população de estudo, definiram-se as folhas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e o material particulado depositado sobre elas. A escolha dessa espécie deveu-se ao fato de ser nativa da região, amplamente encontrada nas áreas de amostragem e de possuir grande importância socioeconômica e comercial. Tradicionalmente, a erva-mate é utilizada na preparação de infusões típicas, como o chimarrão e o tereré. O município de Catanduvas, reconhecido oficialmente como a 'Capital Catarinense do Chimarrão', destaca-se como um dos principais produtores de erva-mate do Estado de Santa Catarina. A espécie *Ilex paraguariensis* pertence à família Aquifoliaceae, é uma árvore perenifólia nativa da América do Sul, com ampla distribuição em áreas de Floresta Ombrófila Mista e Estacional. A distribuição natural da *Ilex paraguariensis* no Brasil abrange principalmente os estados do Sul, como Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com presença significativa em áreas de Floresta com Araucária, estendendo-se também a partes de Minas Gerais e São Paulo. Fora do Brasil, ocorre no leste do Paraguai, nordeste da Argentina e norte do Uruguai. Botanicamente, trata-se de

uma espécie que, sob condições naturais, pode atingir até 30 metros de altura e 100 cm de DAP (Diâmetro à altura do peito), enquanto em cultivos geralmente varia entre 3 a 5 metros de altura. O tronco é reto, cilíndrico, com casca de coloração cinza-clara a acastanhada, espessa e marcada por lenticelas longitudinais. As folhas são simples, alternas, glabras, coriáceas, com margens irregularmente serrilhadas, ápice obtuso e nervuras pouco evidentes na face superior e salientes na inferior. Em geral, medem de 5 a 10 cm de comprimento por 3 a 4 cm de largura (Figura 4) (Carvalho, 2003).

Figura 4
Espécie *Ilex Paraguariensis*



Fonte: Carvalho (2003).

3.2.2 Cálculo do tamanho de amostra e processo de amostragem

Para este estudo, foram selecionadas três áreas de amostragem situadas em diferentes zoneamentos do município de Catanduvas (Figura 5). 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. A área 1 está

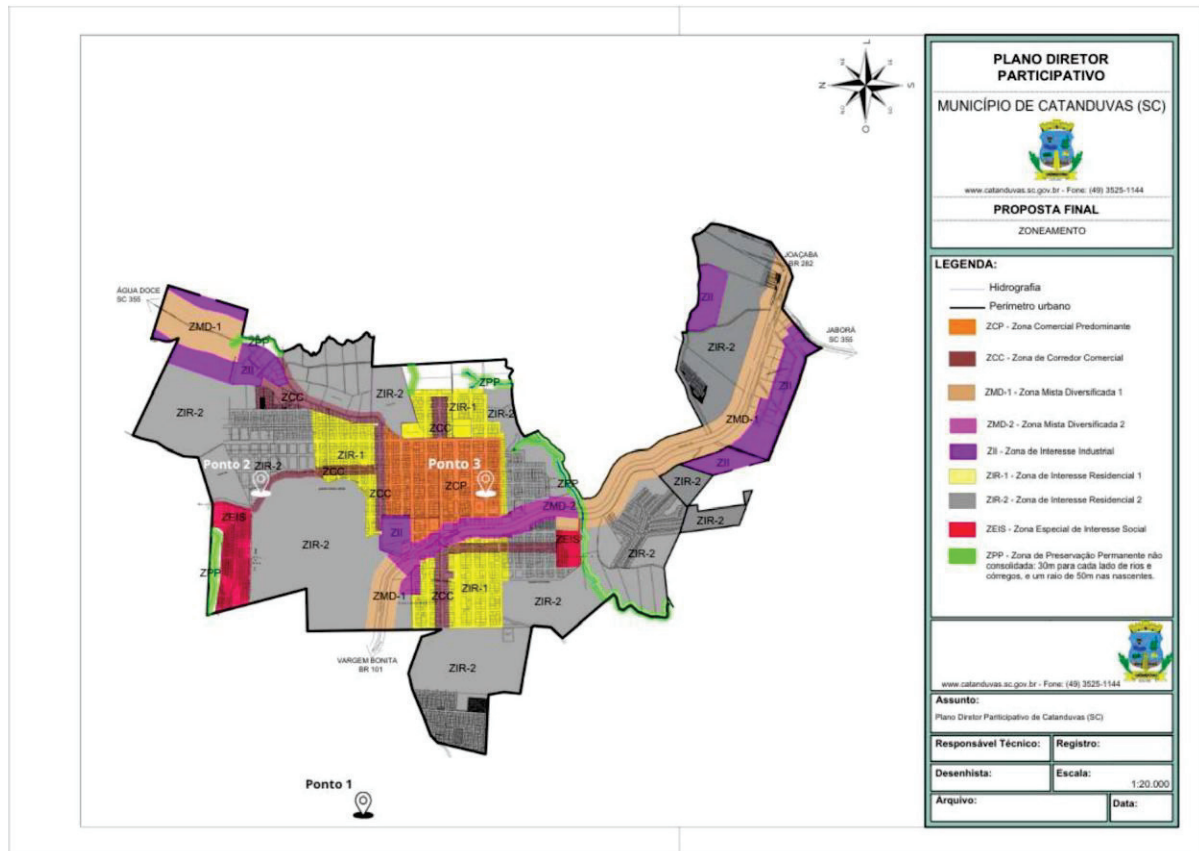
localizada na Macrozona Rural, a área 2 na Zona de Corredor Comercial e a área 3 na Zona Comercial Predominante.

Área 1- Macrozona Rural: localizado em uma zona rural preservada, com predominância de áreas vegetadas (plantio de erva mate), pastagens e fragmentos de vegetação nativa, distante do núcleo urbano de Catanduvas (SC). A região apresenta baixa densidade de edificações e ausência de fontes diretas de poluição atmosférica, como tráfego veicular intenso ou indústrias.

Área 2 - Zona de Corredor Comercial: localizado em uma região urbana, a área 2 apresenta ocupação mista, com vegetação remanescente, edificações dispersas e a presença de uma indústria ervateira de médio porte, que pode contribuir com emissões atmosféricas associadas ao processamento da erva-mate. Adicionalmente, observa-se a proximidade de uma via de tráfego local que conecta bairros do município e passa próximo à área amostrada, o que intensifica a exposição ao material particulado suspenso proveniente da circulação de veículos. Esta área caracteriza-se como um ambiente de pressão antrópica intermediária, com influência combinada de fontes fixas e móveis.

Área 3 - Zona Comercial Predominante: localizado no núcleo urbano consolidado de Catanduvas, a área 3 está inserida em uma região com alta densidade de edificações residenciais e comerciais, além de tráfego urbano intenso. Importante destacar a proximidade com a BR-282, rodovia federal que corta o município e representa uma fonte significativa de emissão de poluentes atmosféricos, especialmente material particulado gerado por veículos.

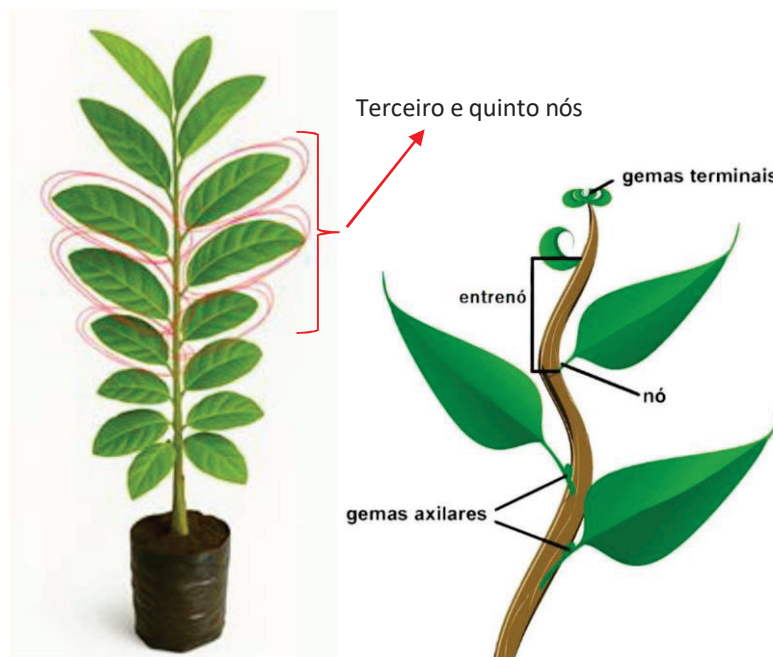
Figura 5
Zoneamento do município de Catanduvas e localização das áreas de amostragem



Fonte: A autora.

Para as análises físico-químicas foram coletadas 25 folhas por área de amostragem, sendo 5 folhas por indivíduo/árvore, e 5 indivíduos por ponto de amostragem (metodologia adaptada de Freer-Smith et al., 2005). Para as análises botânicas foram coletas 50 folhas por ponto de amostragem, sendo 10 folhas de cada indivíduo/árvore, e 5 indivíduos por ponto de amostragem (metodologia adaptada de Witkowski & Lamont, 1991). As folhas foram coletadas de árvores com mais de 10 anos de plantio, antes da colheita de outono-inverno da erva-mate, período em que se apresentam fisiologicamente maduras, com maior espessura foliar, coloração verde-escura e elevados teores de cafeína e polifenóis. Foram selecionadas folhas em posição de recebimento de radiação solar, sem lesões e localizadas entre o terceiro e o quinto nós a partir do ápice do galho (Figura 6). Com relação as amostras de solo foram coletadas amostras de aproximadamente 200 g de solo próximo ao caule de cada indivíduo/planta, sendo 5 indivíduos por área de amostragem, totalizando 1 kg de amostra de solo por área de amostragem.

Figura 6
Metodologia para a coleta das folhas de erva-mate



Fonte: <https://escolaeducacao.com.br/caule/>

3.2.3 Etapas da pesquisa

A pesquisa teve início com a definição do tema, voltado para a poluição atmosférica, com ênfase no estudo de possíveis fontes de emissão de material particulado depositado em folhas e na utilização de plantas como bioindicadoras da qualidade do ar. A escolha do tema baseou-se em sua relevância para o monitoramento ambiental urbano e na necessidade de aprofundar estudos sobre impactos à saúde e ao meio ambiente.

Após essa definição, foi realizada uma revisão bibliográfica em bases nacionais e internacionais, como Elsevier, CAPES, Scopus, Web of Science e SciELO, contemplando artigos publicados entre 2015 e 2025. A pesquisa abordou métodos de fracionamento químico, análise de frações solúveis e insolúveis, uso de folhas urbanas como bioindicadores e técnicas avançadas de caracterização, como métodos cromatográficos e espectrofotométricos. Com o embasamento teórico consolidado, definiu-se o objeto de estudo: folhas de erva-mate, devido à sua abundância na região e à capacidade de reter material particulado. Foram delimitadas as áreas de amostragem para garantir representatividade, e as coletas seguiram protocolos específicos para viabilizar análises químicas e morfológicas em laboratório. As amostras passaram por processos de extração e quantificação de íons solúveis, permitindo identificar a composição do material particulado e possíveis fontes emissoras. Bem como, passaram por análise de parâmetros botânicos a fim de se avaliar a qualidade do ar local.

Os dados obtidos forneceram informações relevantes sobre as características do material particulado depositado, além de reforçar a importância das folhas como bioindicadores da qualidade do ar. Os resultados contribuem para o entendimento dos riscos à saúde humana e fornecem subsídios para ações de gestão e políticas públicas voltadas à redução da poluição. A Figura 7 apresenta as etapas da pesquisa.

Figura 7
Etapas da pesquisa



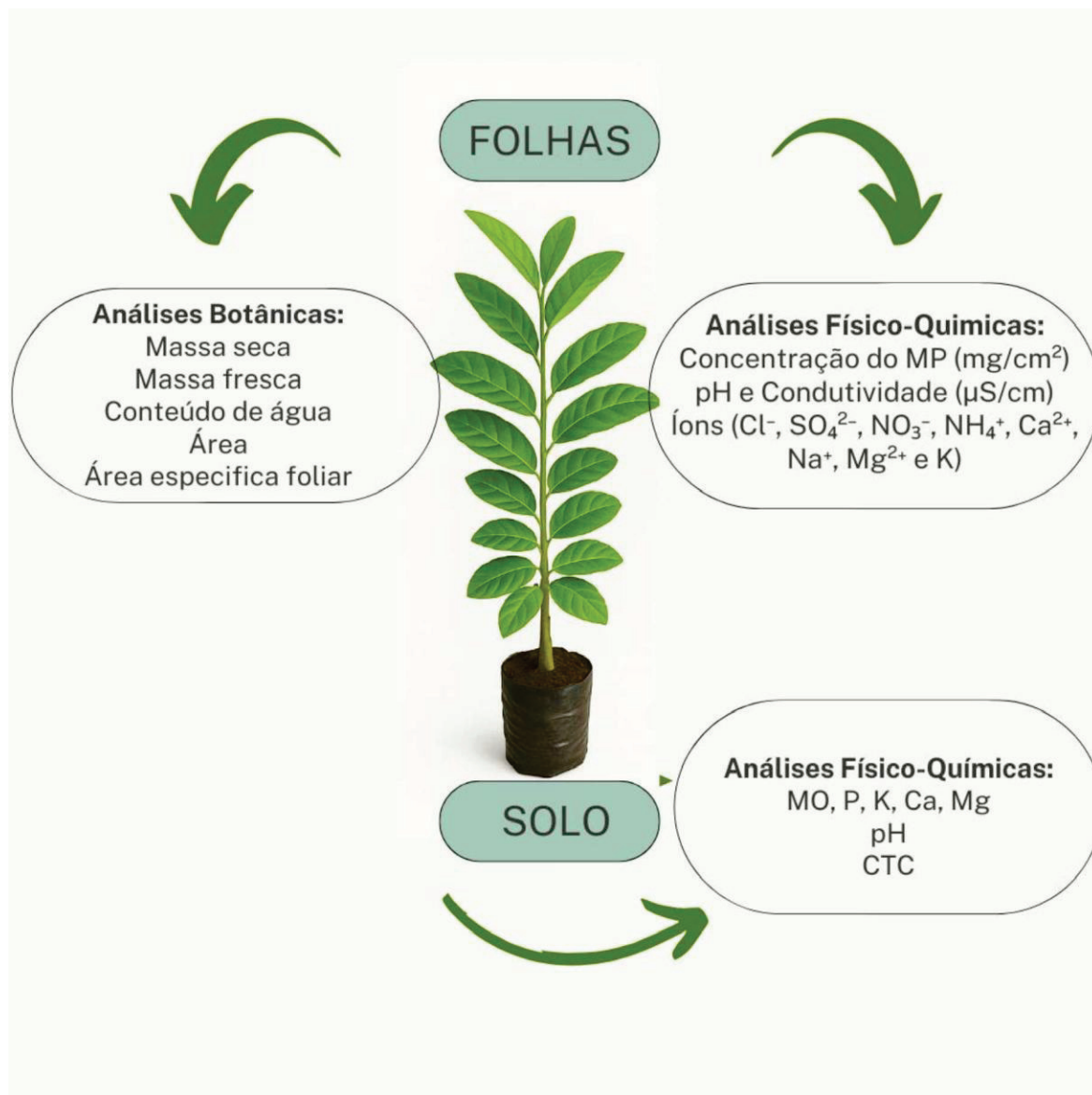
Fonte: A autora.

3.3 PROCESSO DE COLETA DE DADOS

Após a coleta das amostras (folhas de erva-mate e solo), as seguintes análises foram realizadas. Inicialmente o material particulado foliar foi coletado da superfície das folhas e as análises físico-químicas realizadas. Enquanto as folhas de erva-mate foram analisadas quanto aos atributos botânicos. O solo foi avaliado por meio de análises físico-químicas para evitar interferências nos parâmetros botânicos, considerando que a qualidade do solo e do ar influencia diretamente o desenvolvimento das plantas. A Figura 8 apresenta as análises físico-químicas (material particulado foliar e solo) e botânicas realizadas neste trabalho.

Figura 8

Análises físico-química e botânicas



Fonte: A autora.

3.3.1. Determinação da concentração do material particulado foliar e análises físico-químicas

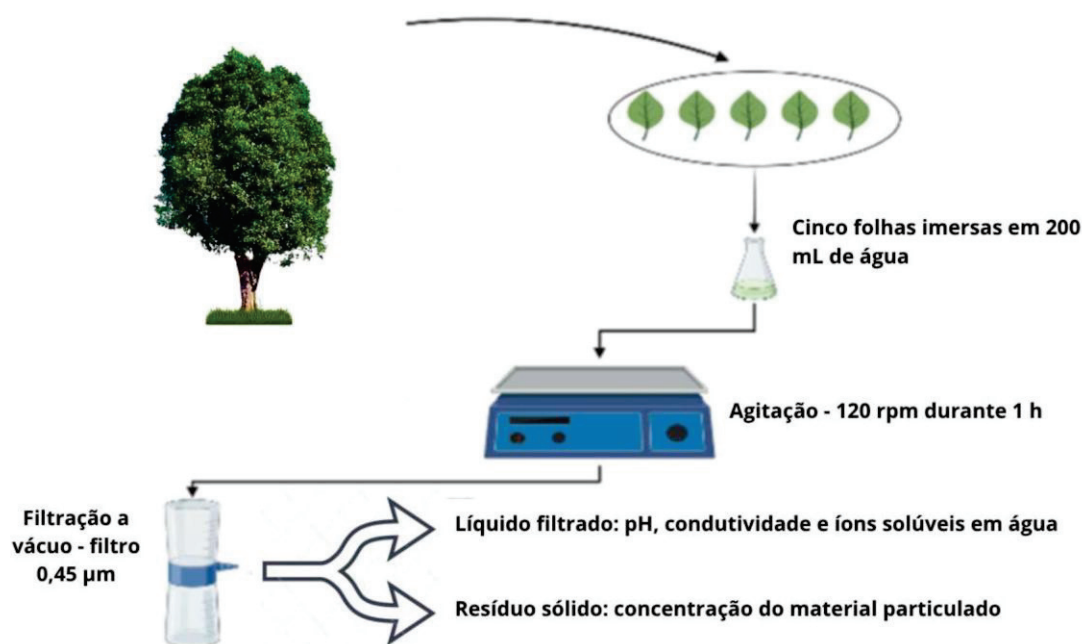
Inicialmente 5 folhas de um mesmo indivíduo/planta foram mergulhadas em 200 mL de água ultrapura Milli-Q, deixados em agitação por 1 h a 120 rotações por minuto. Em seguida, as folhas foram retiradas e realizou-se a filtração utilizando-se filtros de porosidade 0,45 μm (metodologia adaptada de Freer-Smith et al., 2005). O experimento foi realizado em quintuplicata. Uma solução

branca, composta apenas por água deionizada, foi submetida ao mesmo processo de extração das amostras e utilizada como referência nas análises de composição iônica.

O material sólido retido no papel filtro foi utilizado para a quantificação da concentração de material particulado foliar (mg/cm^2), sendo esta obtida por meio do cálculo da diferença de massa do papel filtro $0,45 \mu\text{m}$ antes e após o processo de filtração, dividida pela área foliar. As áreas das folhas foram mensuradas por meio de digitalização utilizando o software Sigma Scan Pro 5.0 (Witkowski e Lamont, 1991). O filtrado por sua vez foi analisado quanto aos valores de pH e condutividade utilizando-se medidor multiparâmetros marca Hanna; e quanto a presença de ânions (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) e cátions (NH_4^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+). A Figura 9 ilustra a metodologia utilizada para quantificação do material particulado foliar e análises físico-químicas.

Figura 9

Fluxograma das análises de folhas e solo



Fonte: Adaptado de Martins et al (2025).

As análises de íons foram realizadas utilizando-se as técnicas de colorimetria, espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e cromatografia de íons; realizadas pela empresa Acquaplant Química do Brasil Ltda, a qual mantém convênio com a Univille; sendo a concentração de íons expressa em mg/L . As metodologias utilizadas para análise da composição iônica

do material particulado estão citadas na Tabela 1. Em todas as determinações, aplicou-se o método de calibração externa, baseado na preparação de soluções padrão em diferentes concentrações, de modo a estabelecer a curva analítica e garantir a linearidade da resposta instrumental. As concentrações dos analitos nas amostras foram obtidas por interpolação dos valores de sinal analítico na curva de calibração.

Tabela 1
 Métodos analíticos para quantificação dos íons solúveis.

Íon	Unidade	Limite de quantificação (LQ)	Limite de detecção (LD)	Metodologia de referência
Amônio	mg/L	0,07	0,002	Colorimetria
Nitrato	mg/L	0,05	0,3	EPA 300.1:1997
Sulfato	mg/L	0,005	0,3	Idem metodologia descrita para nitrato
Cloreto	mg/L	0,05	0,3	Idem metodologia descrita para nitrato
Potássio	mg/L	0,2	0,06	ABNT NBR 10005:2004, ABNT NBR 10006:2004, CONSEMA 026:2013, EPA 200.2:1994, SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B, POP 371, POP 372
Magnésio	mg/L	0,002	0,06	Idem metodologia descrita para potássio
Sódio	mg/L	0,2	0,06	Idem metodologia descrita para potássio
Cálcio	mg/L	0,2	0,06	Idem metodologia descrita para potássio

Por meio de cálculos de conversão (Equação 1) obteve-se os valores de concentração para a composição iônica do material particulado foliar expressa em mg/cm².

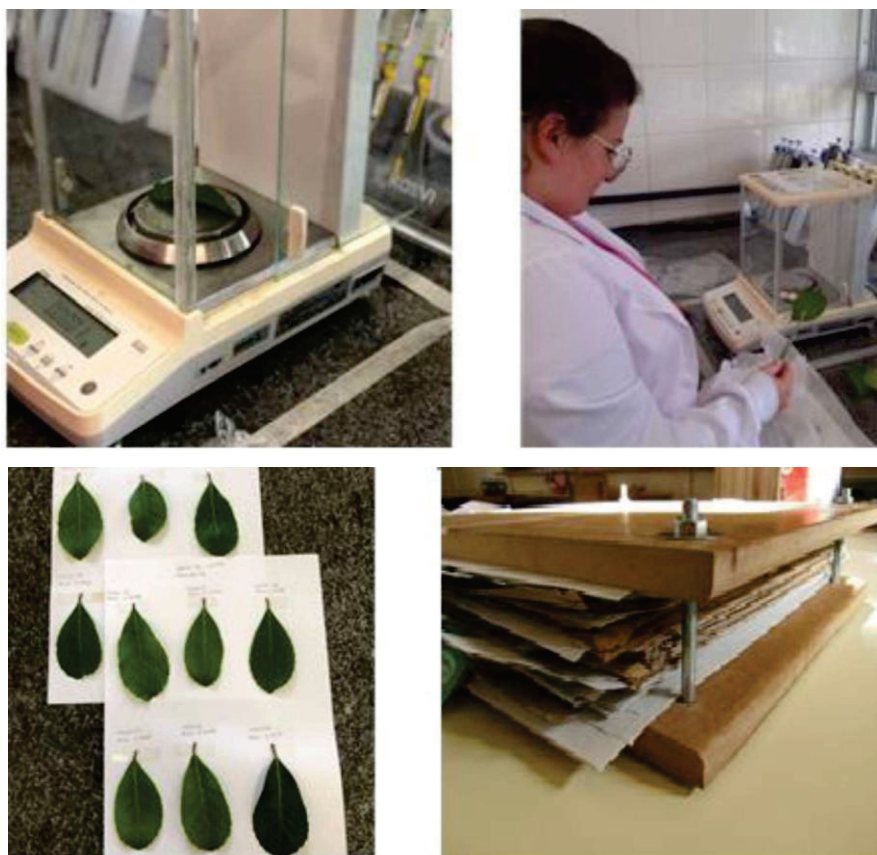
$$mg/cm^2 = \left(\frac{(concentração\ do\ ion\ em\ \frac{mg}{L} \times 200) / 1000}{\text{área\ foliar}\ (cm^2),\ \text{média\ de\ 5\ folhas}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

3.3.2. Análises botânicas

A análise botânica, baseada em 10 folhas por indivíduo/planta, considerou os atributos morfológicos funcionais de: massa fresca foliar (g) obtida em balança analítica de precisão SHIMADZU AUY 220; massa seca foliar (g) obtida em balança analítica de precisão a partir do peso seco constante das folhas dispostas em papel A4, prensadas em treliça e secas em estufa de circulação forçada de ar a 70°C por 72 horas; área foliar (cm²), mensurada por digitalização das folhas secas dispostas em papel A4 utilizando-se o software Sigma Scan Pro (versão 5.0, SPSS Inc., Chicago IL, USA); massa específica foliar (g/cm²), calculada pela razão entre a área foliar e a massa seca, e conteúdo de água, calculado pela subtração entre os valores de massa fresca e massa seca (g) (Curtt, 2019; Witkowski & Lamont, 1991). Os experimentos foram realizados em decuplicata. A Figura 10 ilustra os processos de preparo da amostra para determinação dos atributos morfológicos.

Figura 10

Processos de pesagem e secagem das folhas de Ilex Paraguariensis (erva-mate)



Fonte: A autora.

3.3.3. Análises físico-químicas do solo

Para análise química do solo foram coletados 200 g de solo próximo ao caule de cada indivíduo/planta, sendo 5 indivíduos por área de amostragem, totalizando 1 kg de amostra de solo por área de amostragem. Após homogeneização as amostras foram armazenadas em geladeira até o momento das análises. As análises foram realizadas pela empresa Epagri e consistiram dos seguintes teores, indicativos da qualidade do solo: pH, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e capacidade de troca catiônica (CTC).

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 nitroso 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 oxidação com solução padrão de dicromato de potássio e sulfato ferroso como indicador.

3.4 ANÁLISE DE DADOS

Os dados obtidos foram organizados em planilhas e analisados inicialmente por meio de análise estatística descritiva. Para análise de normalidade dos dados utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk. Para comparação entre médias utilizou-se o teste Anova e o teste *post-hoc* de Tukey, quando necessário. Para a comparação entre medianas utilizou-se o teste Kruskal-Wallis e o teste *post-hoc* de Dunn, quando necessário. Para todos os testes estatísticos utilizou-se o nível de significância de 5%. O coeficiente de Pearson foi utilizado para estudo de relações entre as variáveis concentração de material particulado foliar e concentração total de íons. Análise de Componentes Principais ou PCA (*Principal Component Analysis*) foi utilizada para estudo de relações entre os pontos de amostragem e as variáveis químicas e biológicas. Utilizou-se para as análises estatísticas o *software* Microsoft Excel e o suplemento *Real Statistics*, suplemento gratuito para o Microsoft Excel que amplia as capacidades estatísticas padrão do programa; e o *software* PAST (*PAleontological STatistics*), ferramenta gratuita e de código aberto utilizada para análise estatística de dados.

3.5 PROCEDIMENTOS ÉTICOS DA PESQUISA

Não se aplica.

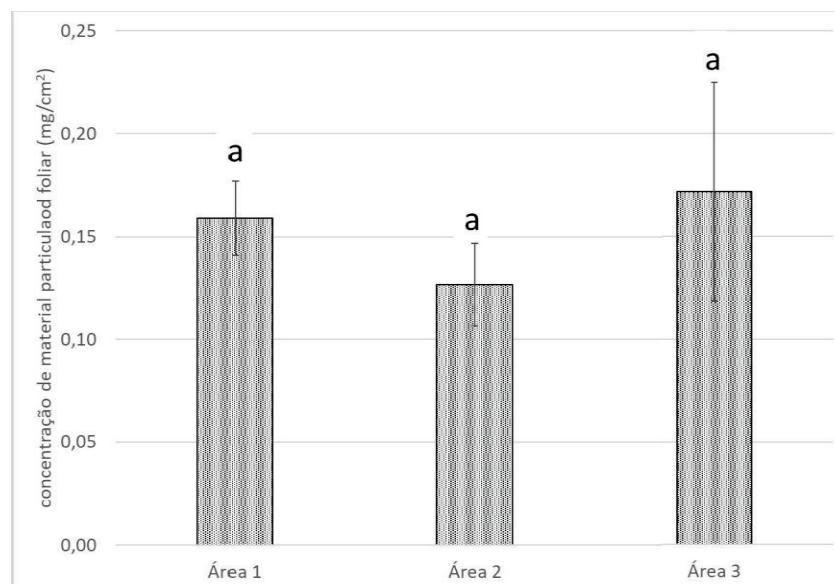
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ACHADOS CIENTÍFICOS

4.1.1 Concentração do material particulado foliar e análises físico-químicas

A Figura 11 apresenta os valores médios de concentração do material particulado foliar (mg/cm^2) das amostras coletas nas três áreas de estudo. Observa-se concentrações de material particulado foliar iguais as $0,16 \pm 0,02$, $0,13 \pm 0,02$ e $0,17 \pm 0,05$ mg/cm^2 para as amostras provenientes das áreas 1, 2 e 3, respectivamente. De acordo com análise estatística, não é observado diferença estatisticamente significativa entre as médias de concentração de material particulado foliar (valor- $p > 0,05$). O material particulado foliar representa a fração mais grossa (de maior massa) do material particulado atmosférico e por isso se deposita mais rapidamente, e por sedimentação seca, sendo removido da atmosfera pela ação da gravidade. Esta fração do material particulado atmosférico também apresenta maior velocidade de queda, conseqüentemente, sua deposição acontece normalmente mais próximo as fontes de emissão, ao contrário das partículas mais finas que podem alcançar locais distantes da fonte de emissão (Beringui et al., 2021).

Figura 11
Concentração média de material particulado foliar (mg/cm^2) nas 3 de amostragem



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

Fonte: A autora

Em estudo semelhante, conduzido por (Santos et al., 2019), realizado em Joinville, Santa Catarina, utilizando a espécie *Alchornea glandulosa*, conhecida como tamanqueiro, como espécie bioindicadora da qualidade do ar, foi observado valor de concentração média de material particulado foliar igual a $3,1 \times 10^{-3} \pm 0,4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ em área localizada próxima a uma indústria metalomecânica de grande porte, sendo esta concentração cerca de 31 vezes superior ao registrado no ponto controle ($0,1 \times 10^{-3} \pm 0,0 \text{ mg/cm}^2$). De forma semelhante, em estudo realizado por (Miranda et al., 2024) no município de Jaraguá do Sul, Santa Catarina, utilizando a espécie *Schinus terebinthifolia*, conhecida como aroeira-vermelha, como planta bioindicadora, foi observado maior valor de concentração de material particulado foliar em área urbana ($0,05 \pm 0,01$) do que em área rural ($0,04 \pm 0,00 \text{ mg/cm}^2$), sendo estes valores estatisticamente diferentes entre si. Os valores de concentração observados em amostras provenientes de área urbana foram 30% maiores que os observados em amostras provenientes de área rural. (Bonatti-Chaves et al., 2024), em estudo semelhante, no município de Joinville, Santa Catarina, utilizando a espécie *Nectandra oppositifolia*, conhecida como canela-ferrugem ou canela branca, como espécie bioindicadora da qualidade do ar, observaram valores de concentração de material particulado foliar iguais a $3,14 \times 10^{-3} \pm 0,4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ em amostras provenientes de área urbano-industrial e iguais a $0,13 \times 10^{-3}$ a $0,15 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ em amostras provenientes de área rural e da área controle (região de floresta). Os valores observados nas amostras provenientes de área urbana foram 24 e 21 vezes superiores aos observados nas amostras provenientes da área rural e controle. Esses resultados sugerem a forte influência das atividades antrópicas na emissão de poluentes atmosféricos, como o material particulado.

Os valores de concentração de material particulado foliar obtidos neste trabalho não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre as áreas de estudo, porém são maiores que os reportados por (Bonatti-Chaves et al., 2024; Miranda et al., 2024; Santos et al., 2019), citados no parágrafo anterior. Por outro lado, se assemelham aos observados por (Cavallaro et al., 2019; Martins et al., 2025; Reis, 2014). (Reis, 2014), utilizando a espécie *Pachira aquatica*, conhecida como monguba, em estudo realizado ao longo da BR-153, a qual apresenta 15 quilômetros de extensão dentro do perímetro urbano de Goiânia, encontraram valores de concentração de material particulado variando de 0,04 a 0,77 mg/cm^2 , sendo os pontos de amostragem localizados em diferentes distâncias a partir do eixo da rodovia (próximo ao eixo e a 100, 200 e 300 m do eixo da via). Árvores localizadas próximas à BR-153 apresentaram maior acúmulo de material particulado, demonstrando a influência do tráfego veicular sobre a concentração deste tipo de poluente atmosférico. (Cavallaro et al., 2019), em estudo realizado no município de Joinville, Santa Catarina, utilizando a espécie *Inga edulis*, conhecida popularmente como ingá-verdadeiro, como espécie bioindicadora da qualidade do ar, relataram concentrações de material particulado foliar iguais a 0,29

$\pm 0,13 \text{ mg/cm}^2$ e $0,18 \pm 0,12 \text{ mg/cm}^2$, em área industrial e área rural, respectivamente. Os autores atribuem a maior concentração de material particulado foliar em área industrial à ausência de medidas de controle, como a instalação de filtros em fontes fixas de emissão, o que intensifica a exposição das plantas à poluição atmosférica em zonas industriais e densamente povoadas. Em estudo realizado por (Martins et al., 2025), em que foi avaliada a capacidade de retenção de material particulado foliar de diferentes espécies arbóreas (*Moquilea tomentosa*, conhecida como Oiti, *Citrus reticulata* - limoeiro, *Psidium guajava* - goiabeira e *Eugenia Uniflora* - pitangueira), localizadas em diferentes áreas do município de Jaraguá do Sul, caracterizados como zona comercial e de serviços do terceiro setor, zona mista diversificada e zona residencial, foram obtidos valores de concentração de material particulado foliar variando de 0,01 a $1,64 \text{ mg/cm}^2$. Os autores observaram menor concentração de material particulado em zona mista diversificada, caracterizada pela combinação de diferentes usos do solo, como residencial, comercial e de serviços; porém com maior foco em atividades comerciais e de serviços diversificadas, sendo o uso residencial apenas tolerado.

Com relação aos valores de pH observa-se soluções levemente ácidas ($6,22 \pm 0,14$, $6,20 \pm 0,13$ e $6,09 \pm 0,03$ nas áreas de amostragem 1, 2 e 3, respectivamente), sem diferenças estatisticamente significativas entre as médias (valor-p > 0,05). (Miranda et al., 2024) realizaram estudo semelhante ao realizado neste trabalho, no município de Jaraguá do Sul, Santa Catarina (SC). Os autores observaram valores de pH iguais a $6,69 \pm 0,36$ em amostras provenientes de área rural e $6,36 \pm 0,09$ em amostras provenientes de área urbana, porém, assim como neste trabalho, não houve diferença estatisticamente significativa entre os valores de pH das soluções provenientes das duas áreas de estudo ($p > 0,05$). Com relação aos valores de condutividade, em uma das áreas de amostragem não se observou normalidade na distribuição dos dados (área 1) então são apresentados a seguir os valores de mediana (máximo - mínimo): 3,9 (12,8 - 2,3); 3,1 (5,6 - 2,5) e 2,8 (4,6 - 2,0) $\mu\text{S/cm}$ para as amostras provenientes das áreas de amostragem 1, 2 e 3, respectivamente; e média \pm desvio padrão: $5,3 \pm 4,2$; $3,6 \pm 1,3$ e $3,0 \pm 1,0 \mu\text{S/cm}$ para as amostras provenientes das áreas de amostragem 1, 2 e 3, respectivamente; não sendo observadas diferenças estatisticamente significativas entre os valores de mediana e de média (valor-p > 0,05). (Miranda et al., 2024) realizaram estudo semelhante ao deste trabalho, no município de Jaraguá do Sul, Santa Catarina (SC). Os autores observaram valores de condutividade elétrica iguais a $30 \mu\text{S/cm}$ evidenciando maior concentração de íons em soluções provenientes de ambientes urbanizados, de maior atividade antrópica. Quando comparados estes valores com os obtidos no presente estudo, nota-se que os valores de condutividade elétrica registrados por (Miranda et al., 2024) foram maiores, entre 6 e 10 vezes superiores, o que pode estar relacionado à diferenças nas intensidades das atividades antrópicas nos dois municípios. O município

de Jaraguá do Sul apresenta maior número de habitantes, bem como maior desenvolvimento industrial em comparação ao município de Catanduvas.

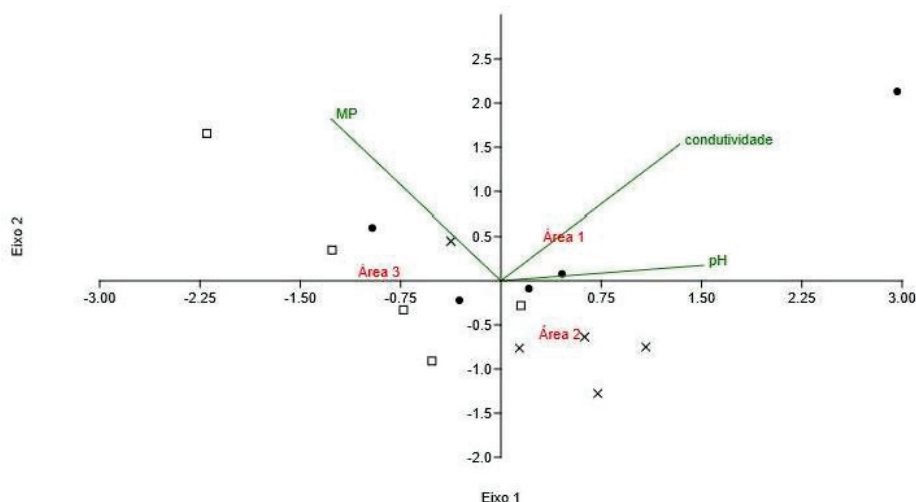
O parâmetro condutividade elétrica é um indicador indireto da concentração de íons no material particulado foliar, os quais podem derivar de diferentes fontes de emissão de poluentes. O material particulado atmosférico com frequência contém sais solúveis, metais e outros compostos higroscópicos que, ao se acumularem nas folhas, aumentam de forma expressiva a carga iônica e, conseqüentemente, alteram a condutividade elétrica das soluções de extração. Assim, uma correlação positiva entre condutividade elétrica e carga iônica pode refletir o efeito direto da deposição de poluentes na superfície foliar, atuando como indicador indireto da qualidade do ar. Ristorini et al. (2020) sugerem a utilização do parâmetro condutividade elétrica como um indicador da concentração de partículas totais em suspensão, simplificando significativamente a técnica para avaliação da deposição de poluentes em ambientes urbanos. Os autores observaram forte associação positiva entre as variáveis concentração iônica total e condutividade elétrica, utilizando diferentes espécies de árvores e, conseqüentemente, diferentes pontos de amostragem em duas cidades na Itália; obtendo desta forma um modelo de regressão linear simples com valores de coeficiente de determinação (R^2) iguais a 0,95 e 0,87 para as amostras coletadas em Nápoles e Terni, respectivamente. Os autores chamam a atenção para o potencial uso de folhas de diferentes espécies de árvores como uma alternativa de baixo custo para o monitoramento da poluição por material particulado. Além disso, indicam que a condutividade elétrica das soluções de lavagem foliar constitui uma técnica rápida e de fácil aplicação para estimar o conteúdo de material particulado solúvel em água. No presente trabalho foram realizados testes de correlação (coeficiente de correlação de *Spearman*) a fim de se avaliar a correlação entre as variáveis concentração iônica total e condutividade elétrica, em cada uma das três áreas de estudo. Entretanto, apesar de se observar correlação entre as variáveis, os valores-p obtidos foram superiores ao nível de significância (5%).

A Figura 12 apresenta a Análise de Componentes Principais (PCA), com o objetivo de se observar padrões de correlação entre as áreas de amostragem e as variáveis ambientais estudadas. Observa-se que a área 1 está posicionada na direção dos vetores de condutividade elétrica - indicativa da presença de íons solúveis provenientes de poluentes atmosféricos e de pH indicativo de processos de deposição de compostos alcalinos ou ácidos, indicando maior influência desses parâmetros na qualidade do ar local, possivelmente associada a fontes de emissão que contribuem para a alteração do pH e da carga iônica do ambiente. A área 3 encontra-se alinhada ao vetor de MP, sugerindo maior influência da concentração de material particulado, o que pode indicar fontes específicas de poluição, como queima de biomassa, poeira de solo ou emissões veiculares. A área 2

está mais próxima do centro inferior do gráfico, não apresentando forte associação com nenhuma das variáveis analisadas, o que indica menor influência dos parâmetros monitorados nesta região.

Figura 12

Análise de componentes principais das variáveis concentração de material particulado, pH e condutividade

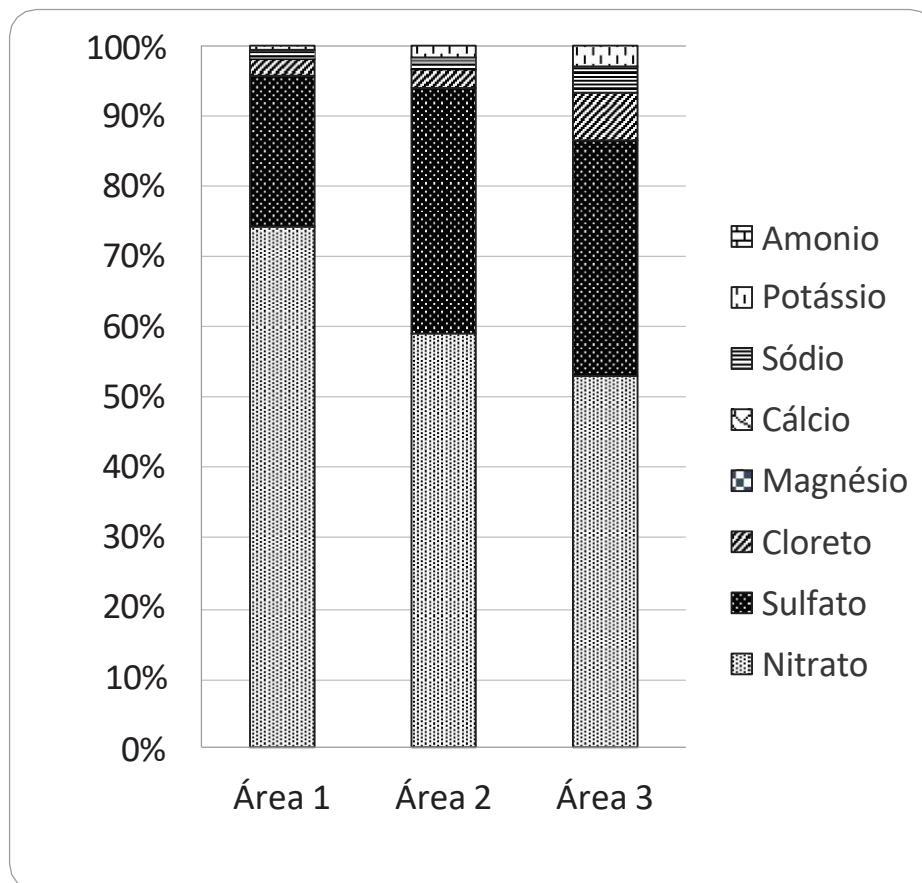


Fonte: A autora

Com relação a composição iônica das soluções obtidas a partir do material particulado foliar proveniente das três áreas de amostragem, observa-se que o íon predominante foi o nitrato (NO_3^-), com percentuais superiores a 50% em todas as amostras: 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 13). A elevada concentração desse íon deve-se a reações secundárias a partir da oxidação atmosférica de óxidos de nitrogênio (NO_x), oriundos majoritariamente de emissões veiculares e de processos industriais. Por essa razão, o nitrato é amplamente reconhecido como um indicador de poluição atmosférica de origem antrópica, particularmente relacionada à combustão de combustíveis fósseis. Ávila, (2010), destaca os veículos automotores como grandes emissores de NO_x e observa que o uso de catalisadores de três vias pode favorecer a geração de amônia, resultando na formação de NH_4NO_3 . Fatores meteorológicos, como baixa umidade e altas temperaturas, influenciam a concentração de nitrato ao favorecer a dissociação do NH_4NO_3 (Da Silva, 2021). No setor agrícola, fertilizantes nitrogenados são uma fonte indireta de nitrato em virtude da emissão de amônia para a atmosfera. A decomposição de matéria orgânica e a criação de animais também são identificadas como fontes adicionais, classificadas como fontes secundárias, uma vez que o nitrato é produzido por transformações químicas atmosféricas (Ávila,

2010; Da Silva, 2021). A queima de biomassa também é citada como fonte complementar de nitrato (Pré, 2022).

Figura 13
Composição iônica do material particulado atmosférico



Fonte: a autora.

O segundo íon encontrado em maior percentual foi o sulfato (SO_4^{2-}), com concentrações de $13 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ na área 1 (22%); $4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ na área 2 (35%) e $8 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ na área 3 (34%) (Figura 13). Sua origem está associada à oxidação do dióxido de enxofre (SO_2), destacam-se como emissores relevantes as atividades veiculares, a combustão de combustíveis fósseis, como carvão e óleo diesel, e processos industriais, especialmente do setor da construção civil, como as cimenteiras, devido às reações químicas em altas temperaturas. A queima de biomassa também constitui uma importante fonte de sulfato, sobretudo em períodos de safra, assim como a suspensão de partículas do solo ricas em cálcio, que podem contribuir para sua formação. Adicionalmente, o sulfato pode ser formado de maneira secundária por meio de reações fotoquímicas, nas quais radicais livres gerados pela radiação solar reagem com o SO_2 , originando ácido sulfúrico. Este, por sua vez, pode reagir com

amônia, formando sulfato de amônio. Condições ambientais favoráveis e a intensidade da radiação solar potencializam esses processos de transformação química na atmosfera. (Ávila, 2010; Da Silva, 2021; Pré, 2022).

O íon cloreto (Cl^-) foi identificado com concentrações de $1 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ na área 1 (2%); $0,3 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ na área 2 (3%) e $2 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ na área 3 (7%) (Figura 13). A presença do íon cloreto (Cl^-) na atmosfera está associada principalmente à sua origem marinha, resultante do *spray* oceânico, da evaporação do mar e do transporte de aerossóis por massas de ar provenientes do oceano. Durante o transporte atmosférico, o cloreto pode sofrer transformações químicas, reagindo com ácidos como HNO_3 e H_2SO_4 , formando HCl na fase gasosa, o que favorece sua remoção da fase particulada. Além disso, o cloreto pode estar relacionado a emissões industriais, queima de resíduos sólidos contendo compostos clorados e o uso de fertilizantes em regiões agrícolas de agricultura intensiva. Destaca-se a liberação de cloreto por queimadas, especialmente na forma de KCl em eventos recentes, ou a presença de K_2SO_4 e KNO_3 em queimadas mais antigas. A queima de resíduos sólidos e as atividades industriais reforçam a contribuição humana para as concentrações atmosféricas de cloreto em ambientes urbanos (Ávila, 2010; Da Silva, 2021; Pré, 2022).

O sódio (Na^+) apresentou concentrações de $1 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ (1%) na área 1; $0,2 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ (2%) na área 2 e $1 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ na área 3 (4%). O íon potássio (K^+) apresentou concentrações de $0,3 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ (1%) na área 1; $0,2 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ (2%) na área 2 e $1 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ na área 3 (3%) (Figura 13). O sódio é um dos principais constituintes dos aerossóis marinhos, podendo indicar transporte atmosférico de sal ou fontes industriais. Já o potássio é amplamente 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, os íons cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e amônio (NH_4^+) não foram detectados em nenhuma das amostras analisadas, possivelmente devido a sua baixa concentração e limitações da técnica analítica utilizada.

Em estudo similar realizado por Martins et al., (2025), utilizando diferentes espécies de plantas, o íon sulfato (SO_4^{2-}) destacou-se entre os ânions analisados, apresentando as maiores concentrações em todas as áreas de estudo, configurando-se como principal indicador de poluição atmosférica secundária. As maiores médias foram observadas na zona comercial, seguida pela zona mista e pela zona residencial próxima a áreas industriais, evidenciando a contribuição de emissões veiculares, processos industriais e oxidação de dióxidos de enxofre. O íon nitrato (NO_3^-) foi detectado em todas as regiões, com maior concentração na zona comercial, indicando influência do tráfego urbano e de fontes fixas de combustão. Nitrato e sulfato são formados por reações que ocorrem na atmosfera, sendo sua maior concentração observada em partículas finas (de diâmetro aerodinâmico $2,5 \mu\text{m}$, por exemplo). O íon cloreto (Cl^-) apresentou valores expressivos, especialmente na zona

comercial, atribuídos à influência marítima e à queima de resíduos sólidos. O cloreto pode ser emitido diretamente para a atmosfera, como um poluente primário, portanto, tende a estar presente em partículas maiores, como o material particulado foliar. Entre os cátions, destacaram-se cálcio (Ca^{2+}), sódio (Na^+) e potássio (K^+), associados, respectivamente, à presença de poeiras minerais, aerossóis marinhos e ressuspensão de solo e material vegetal, variando conforme o perfil de uso e ocupação do solo urbano.

O cálculo de razões diagnósticas entre os íons solúveis identificados no material particulado também auxiliam o estudo sobre possíveis fontes de emissão do material particulado: por exemplo, razão $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ elevada sugere forte contribuição de emissões veiculares (NO_x) ou de queima de biomassa em relação a fontes de enxofre (combustão de carvão, indústrias) — enquanto baixa pode indicar domínio de fontes de SO_2 ; relação entre cátions como Ca^{2+} e Mg^{2+} indica origem crustal ou poeira de solo, construção ou ressuspenção de materiais naturais; concentrações altas de NH_4^+ associadas a NO_3^- ou SO_4^{2-} apontam para fontes agrícolas ou industriais que emitem amônia ou fertilizantes; Cl^- e Na^+ elevados indicam influência marinha, mas também podem derivar de queima ou de processos industriais com cloretos. 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^+ com outros elementos típicos de biomassa ajudam a reforçar a hipótese de queima de biomassa como fonte. Neste trabalho não foi identificada, de acordo com o limite de detecção da técnica analítica utilizada, a presença dos íons cálcio, magnésio e amônio no material particulado foliar solúvel. As razões diagnósticas para os demais íons analisados foram calculadas e as correlações entre elas avaliadas por meio do coeficiente de correlação de *Spearman*. Dentre todas as correlações a única que apresentou significância estatística (valor- $p < 0,05$) foi a correlação entre os íons nitrato e sulfato, nas áreas 1 e 3, com coeficientes de correlação iguais a 0,9 e 1, respectivamente. Esses resultados indicam que os precursores desses íons (isto é, compostos como NO_x para nitrato, e SO_2 para sulfato) 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. Os valores das medianas das razões diagnósticas $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ para as áreas 1 e 3 foram iguais a 2,9 (1,9 – 3,8) e 1,1 (0,8 – 3,9), respectivamente. A Área 3 está situada em região de alta densidade populacional e com tráfego urbano intenso, além de estar próxima à BR-282 (255 metros), rodovia federal que atravessa todo o estado, representando uma fonte significativa de poluentes atmosféricos, especialmente material particulado oriundo de veículos pesados. É observado na Área 3 a presença de madeira, lojas de material de construção, serviço de mecânica e lavagem de carros, consultórios, restaurantes, pizzarias, supermercados, lojas comerciais diversas, hotéis que utilizam o sistema de caldeira para

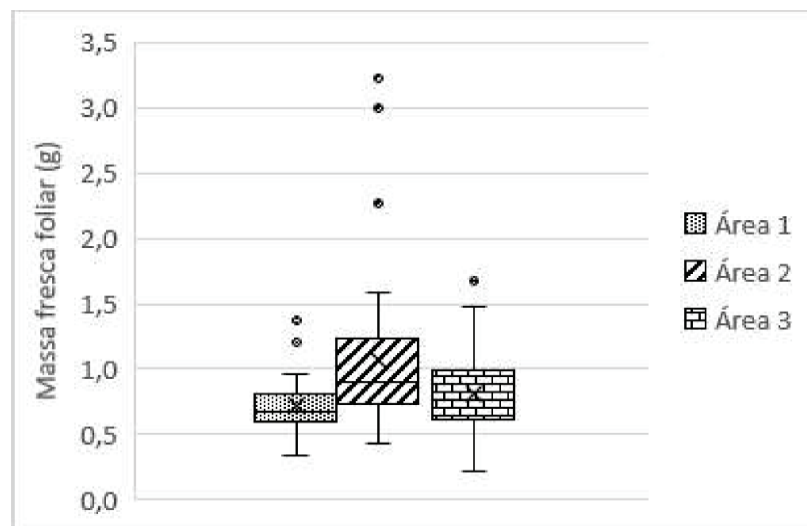
aquecimento de água, hospital, residências cujo sistema de aquecimento principal está baseado no uso de lareira e fogão à lenha, cemitério e uma grande fábrica de rações para aves e suínos. Por outro lado, a Área 1 encontra-se em zona rural, distante do núcleo urbano, com baixa densidade populacional e sem fontes industriais importantes; porém, por estar próxima à BR-282 (570 metros), ainda que parcialmente protegida por vegetação, há indícios de que essa rodovia também contribuiu para os resultados observados nesta área. Apesar de menor densidade populacional, observa-se nesta área de estudo a presença de ervateira, madeireira e serviço de peque e pague. A área 2 apresentou os menores valores de concentração de íons, apesar de estar situada em uma região com diversas atividades potencialmente emissoras, como uma fábrica ervateira, fábrica de chás, área de cultivo de hortaliças, mercadinho, oficina mecânica, lavação de veículos, marmoraria, pet shop, barracão com máquinas da prefeitura (Secretaria de Infraestrutura e Agricultura), balneário municipal e áreas residenciais. Além disso, encontra-se próxima ao Distrito Industrial I, que abriga serviços de chapeação e pintura, fábrica de ração, funilaria, transportadora, fábrica de móveis e madeireira. Essa área é também a mais distante da rodovia BR-282 (aproximadamente 1.200 metros), a qual tem se mostrado uma fonte relevante de emissão de poluentes.

Comumente estudos sobre composição iônica estão associados ao material particulado respirável, isto é, aquele com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a $2,5 \mu\text{m}$. Estudos relacionados a composição iônica do material particulado foliar são escassos. Chen et al. (2024) investigaram as características botânicas e químicas do material particulado depositado nas superfícies foliares de duas espécies de plantas em dois ambientes distintos: aquático e terrestre. As características botânicas analisadas incluíram a área foliar e a área foliar específica, enquanto as características químicas envolveram a composição iônica do material particulado retido nas folhas. Os resultados mostraram que o tipo de ambiente influenciou a composição do material particulado foliar. Especificamente, plantas em habitats terrestres acumularam partículas maiores e mais grossas, com predominância do íon Ca^{2+} inorgânico, representando mais de 70% dos íons totais. Em contraste, plantas em habitats aquáticos acumularam partículas finas e secundárias, com altas frações de NO_3^- e SO_4^{2-} solúveis em água, correspondendo a mais de 65% dos ânions totais. Além disso, o acúmulo de partículas nas folhas reduziu a condutância estomática, afetando negativamente a transpiração e a fotossíntese. Esse estudo fornece entendimentos sobre o impacto e o papel de plantas de diferentes habitats na mitigação da poluição por partículas urbanas.

4.1.2 Análises botânicas

As Figuras 14, 15 e 16 apresentam os resultados obtidos para os parâmetros massa fresca foliar, massa seca foliar e conteúdo de água. Os dados obtidos não apresentaram distribuição normal, conforme verificado pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Dessa forma, optou-se por apresentar os resultados por meio de gráficos do tipo boxplot, de modo a evidenciar as medianas. Com relação ao parâmetro massa fresca, de acordo com o teste de Dunn, observa-se que 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. Essa diferença pode refletir uma resposta morfofisiológica diferenciada das plantas sob condições ambientais específicas daquele local.

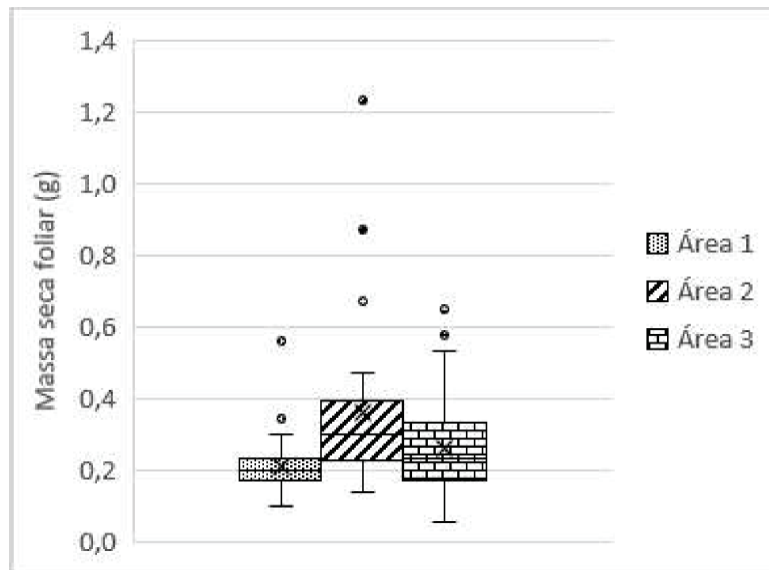
Figura 14
Parâmetro botânico massa fresca foliar



Fonte: A autora.

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.

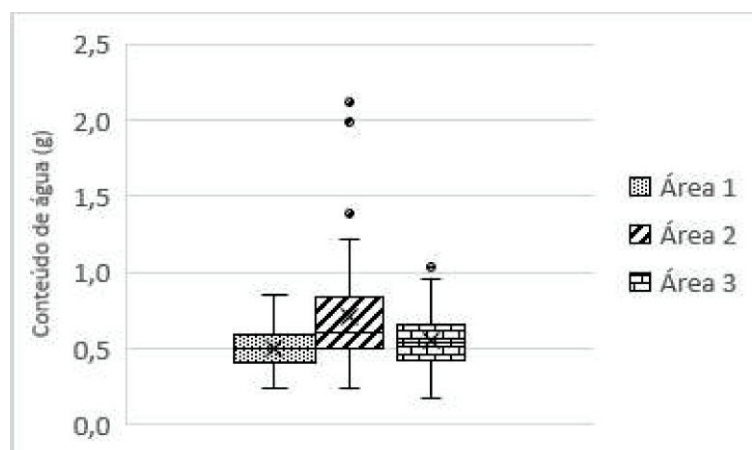
Figura 15
Parâmetro massa seca foliar



Fonte: A autora.

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.

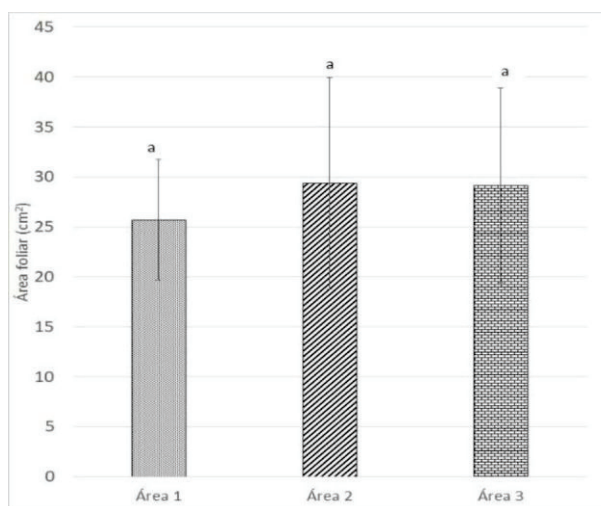
Figura 16
Parâmetro conteúdo de água



Fonte: A autora.

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 17 e 18).

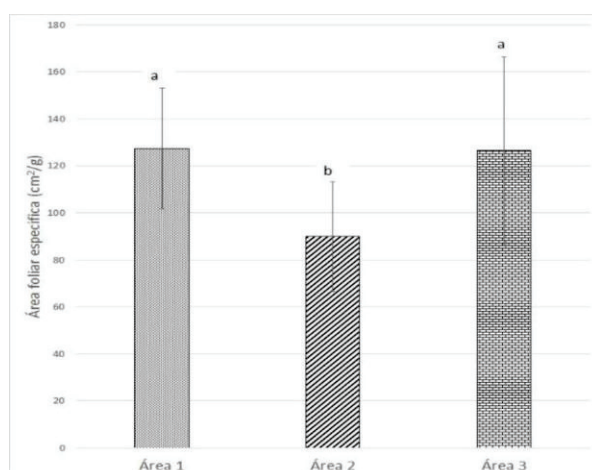
Figura 17
Parâmetro área foliar



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

Fonte: A autora.

Figura 18
Parâmetro área foliar específica



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

Fonte: A autora.

De acordo com o teste estatístico Anova, nível de significância de 5%, não existe diferença entre as médias de área foliar, nas três áreas de estudo, o que sugere padrão morfológico semelhante entre os indivíduos amostrados nas diferentes áreas. Contudo, com relação ao parâmetro área foliar específica - que indica a relação entre área foliar e massa seca, observou-se diferença entre as médias, sendo a média da área 2 inferior, enquanto as médias das áreas 1 e 3 são iguais entre si e superiores à da área 2. Maiores valores de área foliar específica são consequência da redução dos tecidos do mesofilo da planta, tais alterações estruturais indicam uma resposta adaptativa ao estresse ambiental voltada à manutenção da estrutura foliar em detrimento da capacidade fotossintética (Schaidhauer et al., 2024).

Cavallaro et al. (2019), em estudo realizado com a espécie *Inga edulis* em duas áreas do município de Joinville/SC —uma zona industrial (considerada poluída) e um remanescente florestal (área controle) — observaram aumento na área foliar específica e redução significativa na espessura da epiderme adaxial e abaxial, do parênquima paliçádico, do parênquima lacunoso e da espessura total do limbo foliar dos indivíduos expostos a maiores níveis de poluição. Esses atributos estão diretamente relacionados à capacidade fotossintética da planta, indicando que o material particulado acumulado na superfície foliar interfere na difusão de CO₂ e na incidência de luz, afetando a fisiologia vegetal de forma significativa. Os indivíduos da área controle apresentaram maiores médias de massa fresca, massa seca e área foliar, sugerindo que plantas localizadas em ambientes menos poluídos priorizam o investimento em tecidos fotossintetizantes e no crescimento vegetativo. A análise de correlação de *Pearson* demonstrou associações negativas entre a concentração de material particulado e diversos atributos morfoanatômicos, sendo os coeficientes mais expressivos observados para a espessura total do limbo ($r = -0,60$), massa seca ($r = -0,42$) e massa fresca ($r = -0,38$). Esses resultados reforçam que o acúmulo de material particulado interfere diretamente no desenvolvimento vegetal, especialmente em atributos fisiologicamente relevantes, confirmando que *Inga edulis* responde de forma sensível à poluição atmosférica e se qualifica como bioindicadora eficaz da qualidade ambiental urbana. A utilização de espécies nativas em programas de biomonitoramento representa, portanto, uma ferramenta eficiente para a detecção de alterações ecológicas provocadas por poluentes atmosféricos, além de subsidiar políticas públicas voltadas à mitigação de impactos ambientais.

Neste trabalho, foi realizada a análise de correlação de *Pearson* entre a concentração de material particulado foliar e os parâmetros botânicos avaliados, com o objetivo de identificar possíveis efeitos fisiológicos associados à deposição de partículas nas folhas. Observou-se correlação negativa entre a concentração de material particulado foliar e os parâmetros massa fresca ($r = -0,42$), massa

seca ($r = -0,30$), conteúdo de água ($r = -0,47$) e área foliar ($r = -0,38$). Além disso, verificou-se correlação positiva entre a concentração de material particulado foliar e a massa foliar específica ($r = 0,38$). Esses resultados sugerem que o acúmulo de partículas sobre a superfície foliar pode alterar as características morfofisiológicas das folhas, reduzindo a eficiência fotossintética e o crescimento vegetal, possivelmente em função do bloqueio parcial da radiação solar, obstrução dos estômatos e comprometimento das trocas gasosas. Tais evidências corroboram o estudo apresentado por Cavallaro et al. (2019), que demonstrou que maiores concentrações de material particulado interferem diretamente no desenvolvimento vegetal, especialmente em atributos fisiologicamente relevantes.

A espécie *Alchornea glandulosa* foi utilizada por (dos Santos et al., 2019) como bioindicadora para avaliar os efeitos da poluição atmosférica em atributos foliares no município de Joinville (SC). Os autores observaram relação inversa entre a deposição de material particulado nas folhas e o desenvolvimento foliar, com indivíduos em área industrial apresentando menor massa fresca, massa seca, conteúdo de água e área foliar, além de maior área foliar específica, indicando resposta adaptativa ao estresse ambiental. Os resultados confirmam a sensibilidade da espécie à poluição atmosférica, destacando seu potencial como bioindicadora da qualidade do ar em ambientes urbano-industriais.

A espécie nativa *Piper gaudichaudianum*, amplamente distribuída no sub-bosque da Mata Atlântica, foi selecionada por (Schaidhauer et al., 2024) como bioindicadora para avaliação dos efeitos da poluição atmosférica em áreas urbanas industrializadas. As coletas foram realizadas em dois pontos distintos do município de Joinville/SC: a área A, situada próxima a uma mineradora e a uma indústria de autopeças (caracterizada por intensa emissão de material particulado), e a área B, utilizada como controle, localizada a maior distância e separada por barreiras naturais. Os parâmetros botânicos avaliados incluíram teores de clorofilas A, B e total, massa fresca e seca das folhas, área foliar e espessura da lâmina. Os resultados apontaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,001$) em todos os atributos analisados. As folhas provenientes da área A apresentaram teores significativamente reduzidos de clorofila A, clorofila B e clorofila total, em comparação com as folhas da área B. Essa redução sugere diminuição da atividade fotossintética em ambientes poluídos. Do ponto de vista morfológico, as folhas da área A também apresentaram menor massa fresca, menor massa seca e área foliar reduzida, quando comparadas à área B. Tais resultados indicam prejuízos ao crescimento vegetativo e comprometimento da fisiologia da planta em ambientes impactados por poluentes atmosféricos. A análise de componentes principais (PCA) revelou que os parâmetros de clorofila e massa foliar foram os maiores responsáveis pela distinção entre os grupos analisados, explicando 74% da variabilidade total dos dados. Tais resultados evidenciam que *Piper*

gaudichaudianum responde de maneira sensível e mensurável à presença de poluentes atmosféricos, reforçando seu potencial como espécie bioindicadora em estudos de biomonitoramento ambiental.

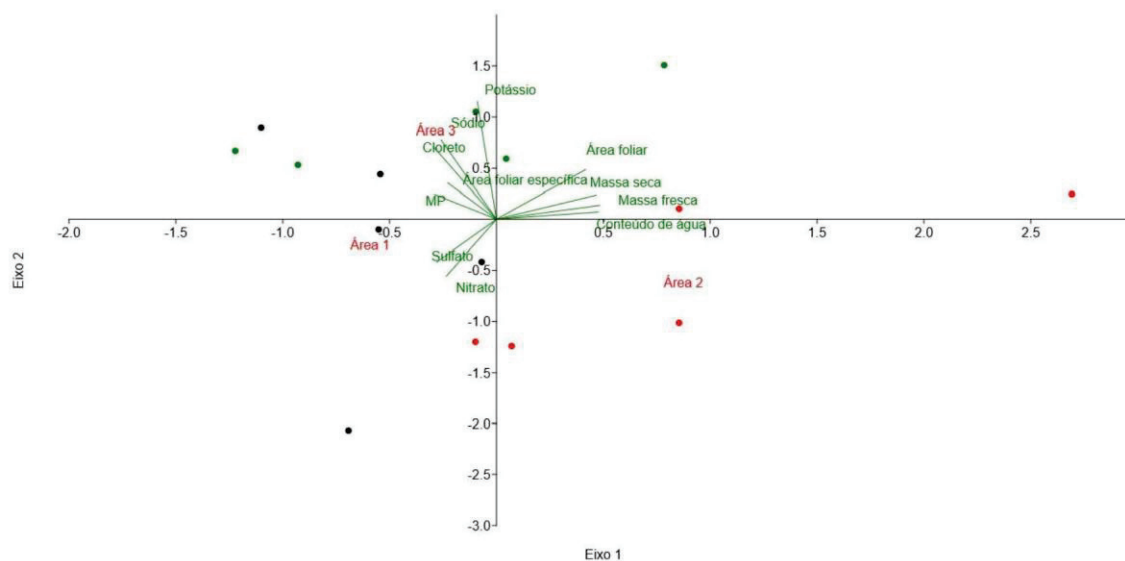
Devkota et al. (2024), avaliaram as características morfológicas e anatômicas de folhas de seis espécies de plantas (*Bougainvillea glabra*, *Callistemon citrinus*, *Euphorbia pulcherrima*, *Jasminum mesnyi*, *Lagerstroemia indica* e *Nerium oleander*), em diferentes locais de Kathmandu, capital do Nepal. Os autores observaram que todas as espécies exibiram redução significativa ($p < 0,05$) da área foliar quando localizadas em locais caracterizados como poluídos. Dentre as espécies analisadas os maiores decréscimos foram observados em *E. pulcherrima* para comprimento foliar (25 %) e largura foliar (18,62 %), e em *L. indica* para área foliar (28 %); enquanto os menores decréscimos foram registrados em *N. oleander* para comprimento (7,58 %) e em *C. citrinus* para largura (11,3 %) e área foliar (13,90 %).

Neste trabalho foram realizados testes de correlação (coeficiente de correlação de *Spearman*) a fim de se avaliar a correlação entre as variáveis concentração de material particulado foliar e parâmetros botânicos (massa fresca, massa seca, conteúdo de água, área foliar e área foliar específica), em cada uma das três áreas de estudo. Apesar de na área 2 ser observada correlação negativa para as variáveis massa fresca, massa seca, conteúdo de água e área foliar, além de correlação positiva para a variável área específica foliar; como observado por outros autores citados no texto acima (dos Santos et al., 2019), os valores-*p* deste trabalho foram superiores ao nível de significância (5%).

Com relação a análise de componentes principais das variáveis botânicas obteve-se como resultado que as variáveis massa fresca e massa seca explicaram 95,7% da variância total, assim dois eixos foram utilizados, estando associados ao eixo 1 as variáveis massa fresca, massa seca, conteúdo de água e área foliar; e associado ao eixo 2 a variável área foliar específica (Figura 19). Observa-se que a área de estudo 2 apresentou maiores valores associados ao eixo 1; enquanto as áreas de estudo 1 e 3 apresentaram maiores valores associados ao eixo 2. Maiores valores associados a área foliar específica (eixo 2) sugerem indivíduos expostos a maiores níveis de poluição (atividade antrópica), conforme discutido nos parágrafos anteriores (Cavallaro et al., 2019; dos Santos et al., 2019). Entretanto, é importante ressaltar que, além da qualidade do ar, a qualidade do solo também desempenha um papel crucial no desenvolvimento das plantas. No item subsequente, serão abordados os principais parâmetros utilizados para a avaliação da qualidade do solo. Os resultados dessa análise indicam que as três áreas de estudo apresentaram características químicas distintas, impossibilitando a atribuição das variações observadas nos parâmetros botânicos à qualidade do solo.

Figura 19

Análise de componentes principais das variáveis botânicas e químicas (íons).



Embora se esperasse que a área 1, situada na Macrozona Rural, apresentasse melhores indicadores botânicos devido à sua localização afastada do núcleo urbano e à predominância de áreas vegetadas, pastagens e fragmentos de vegetação nativa, observou-se uma similaridade entre as áreas 1 e 3, especialmente em relação à área específica foliar, um indicativo de estresse ambiental. A área 1, embora localizada em uma região rural, encontra-se próxima à BR-280 (570 metros), uma rodovia de intenso tráfego de veículos que liga o Estado de leste a oeste, podendo ter influenciado na composição iônica do material particulado foliar. Análises revelaram concentrações mais elevadas de nitrato e sulfato na área 1 (nitrato: $46 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$; sulfato: $13 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$) em comparação com as áreas 2 (nitrato: $7 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$; sulfato: $4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$) e 3 (nitrato: $13 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$; sulfato: $8 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$), sugerindo que, apesar da localização rural, a proximidade de fontes de emissão veicular e atividades agrícolas contribuem para a presença desses íons em maior concentração no material particulado foliar. A maior concentração de nitrato pode estar associada às emissões veiculares provenientes da rodovia próxima, bem como ao uso de fertilizantes nitrogenados, criação de animais e queima de biomassa, comuns em regiões agrícolas. A maior concentração de sulfato pode estar associada a combustão de combustíveis fósseis e queima de biomassa, em que são liberados compostos sulfurados como o SO_2 que, ao interagirem com outros poluentes e condições atmosféricas, podem formar sulfato (Ávila, 2010; Da Silva, 2021; Pré, 2022).

4.1.3 Análise do solo

A Tabela 2 apresenta os parâmetros químicos analisados para avaliação da qualidade do solo. Os parâmetros normalmente analisados são pH, matéria orgânica, nutrientes como fósforo, potássio, cálcio, magnésio e a capacidade de troca catiônica CTC. O pH mede a acidez ou a alcalinidade do solo, e influencia diretamente na absorção dos nutrientes, bem como de elementos tóxicos, como o alumínio. O conteúdo de matéria orgânica está relacionado a fertilidade do solo, pois sua presença propicia aumento da capacidade de retenção de nutrientes e melhora a estrutura do solo. A concentração de nutrientes como fósforo, potássio, cálcio e magnésio também deve ser considerada para avaliação da qualidade do solo. O fósforo é imprescindível para a formação de raízes, floração, no metabolismo do DNA e energético; o potássio tem papel fundamental na regulação de processos fisiológicos como a abertura dos estômatos, o transporte de água e a resistência a doenças; o cálcio é utilizado na estrutura das paredes celulares e a ativação de enzimas; e o magnésio é o componente principal na clorofila, tornando-o essencial no processo de fotossíntese. A capacidade de troca catiônica (CTC) está relacionada a capacidade do solo de reter e liberar cátions (nutrientes carregados positivamente), evitando a lixiviação (Sobral et al., 2015).

Tabela 2

Interpretação de parâmetros da análise de solo

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

Com relação ao pH em ambas as áreas de estudo este apresentou-se ácido (considera-se como ideal para a disponibilização de nutrientes para a planta valores entre 6,0 e 6,8). Entretanto, a erva-mate em seu processo de evolução natural se adaptou às condições de solos com acidez elevada, tanto com valores baixos de pH como com teores altos de alumínio (solos com pH ácido possuem alumínio trocável em quantidades tóxicas para as plantas); sendo considerada como espécie tolerante ao alumínio, e que apresenta caráter calcífuga (espécie que cresce em meio ácido e pobre em matéria

calcária) (Peixoto et al., 2022). Os teores de matéria orgânica foram de 4,1 %, 3,1 % e 8,2 % nas áreas de estudo 1, 2 e 3, respectivamente. Conforme Goulart (2023), o teor de matéria orgânica para análise da qualidade do solo é classificado como baixo, médio e alto, sendo considerados baixos os valores menores ou iguais a 2,5 %, médios os valores entre 2,6 % e 5,0 % e altos os valores maiores que 5,0 %. Com relação aos elementos cálcio e magnésio, na área de estudo 1, a disponibilidade de cálcio foi classificada como baixa e a de magnésio como média; na área 2, cálcio foi classificada como média e magnésio alta; e na área 3 ambos os elementos apresentaram classificação alta. Com relação a interpretação da disponibilidade de potássio, interpretada de acordo com a Capacidade de Troca de Cátions (CTC) a pH 7,0 (CTC pH_{7,0}), a área 1 foi classificada como teor médio, e as áreas 2 e 3 como teores altos. Quanto a classificação do parâmetro valores de CTC todas as áreas foram classificadas na categoria alta, isto é, solos com boa capacidade de retenção e disponibilização de nutrientes como cálcio, magnésio e potássio, devendo-se, no entanto, atentar para a dependência deste parâmetro dos valores de saturação de bases (é a porcentagem da CTC ocupada por cátions como cálcio, magnésio, potássio e sódio) e do pH. O teor de fósforo em todas as áreas de estudo foi classificado como muito baixo, sendo este dependente do teor de argila no solo (a área 1 apresentou teor de argila igual a 31%, as áreas 2 e 3 apresentaram teores de argila 53 e 42 %, respectivamente). De acordo com Goulart (2023), a erva-mate tem como característica adaptativa concentrar fósforo em seus tecidos como reserva frente ao seu desenvolvimento em solos pobres em fósforo.

Conforme classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS e dados disponibilizados no Mapa de Solos de Santa Catarina elaborado pela Embrapa, a caracterização pedológica da região de Catanduvas (SC), localizada no Oeste Catarinense, evidencia a predominância de dois grandes grupos de solos: latossolos e cambissolos. Esses solos apresentam potencial produtivo, mas exigem manejo adequado para mitigar limitações químicas recorrentes na região Oeste de Santa Catarina, como acidez elevada e baixa disponibilidade de fósforo. Essas condições pedológicas justificam a adoção de estratégias de manejo sustentável, incluindo a calagem para correção da acidez, a adubação orgânica para reposição de nutrientes e práticas conservacionistas para preservação da estrutura do solo.

4.2 APLICABILIDADE DO ESTUDO

A aplicabilidade deste estudo consiste em fornecer as primeiras informações sobre poluição atmosférica no município de Catanduvas - SC. Os resultados obtidos servirão de base para o desenvolvimento de técnicas de avaliação da qualidade do ar mais acessíveis e eficientes, além de possibilitar a criação de um sistema de monitoramento contínuo que funcione como um alerta para níveis de poluentes prejudiciais.

Os dados gerados por esse sistema poderão subsidiar os órgãos competentes na implementação de ações de controle da poluição atmosférica, apoiar a formulação de políticas públicas para mitigação de impactos ambientais e promover iniciativas de educação ambiental e conscientização da população.

5 REPERCUSSÕES E CARÁTER INOVADOR DA PESQUISA

Esta pesquisa, desenvolvida em Catanduvas-SC, apresenta caráter inovador ao demonstrar a aplicabilidade da espécie *Ilex paraguariensis* como bioindicadora da qualidade do ar em municípios de pequeno porte, oferecendo uma alternativa prática, de baixo custo e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Suas repercussões sociais são expressivas, pois a produção de dados inéditos no município sobre poluição atmosférica fornece subsídios para a gestão pública e para a conscientização comunitária sobre riscos ambientais, permitindo à população apropriar-se do conhecimento científico para melhorar suas condições de vida e discutir soluções para problemas ambientais locais. No âmbito tecnológico, a validação da erva-mate como bioindicadora representa um avanço acessível para diversos municípios, permitindo disseminar técnicas simplificadas de avaliação ambiental e incentivar o uso de tecnologias sociais voltadas ao monitoramento da qualidade do ar em diferentes escalas. Em relação à repercussão sanitária, o estudo oferece informações essenciais para a gestão da saúde ambiental, permitindo antecipar riscos associados à inalação de partículas poluentes e subsidiar políticas municipais voltadas à prevenção de doenças respiratórias e ao planejamento de ações intersetoriais. Na dimensão cultural, a pesquisa valoriza a erva-mate, espécie profundamente ligada à identidade regional, reforçando práticas tradicionais ao mesmo tempo em que amplia seu uso para fins ambientais. No campo artístico, os dados podem inspirar projetos educativos e culturais que integrem ciência, natureza e produção artística, fortalecendo a criatividade e a sensibilização ambiental. Assim, o trabalho evidencia impacto regional e potencial de adoção em diversos territórios do país, ampliando sua contribuição ao desenvolvimento sustentável e às comunidades.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da espécie *Ilex paraguariensis* (erva-mate) como bioindicadora da qualidade do ar e de possíveis fontes de emissão mostrou-se eficiente. Em relação à concentração de material particulado foliar, os valores variaram de 0,105 a 0,172 mg/cm², sem diferença significativa entre as áreas de amostragem. Ainda assim, essas concentrações são comparáveis às observadas em municípios de maior porte, como Joinville, Jaraguá do Sul e Goiânia, entre outros.

Quanto à composição iônica, os íons encontrados em maior concentração foram nitrato (NO₃⁻), sulfato (SO₄²⁻) e cloreto (Cl⁻). O nitrato está relacionado principalmente à oxidação de óxidos de nitrogênio (NO_x), emitidos por fontes fixas de combustão e tráfego veicular intenso. O sulfato forma-se, em geral, pela oxidação de dióxido de enxofre (SO₂), proveniente da queima de combustíveis fósseis, emissões veiculares e processos industriais. Já o íon cloreto pode estar associado a fontes antrópicas, como a queima de resíduos sólidos contendo compostos clorados, uso de fertilizantes e determinadas atividades industriais. As concentrações mais elevadas desses íons foram observadas nas áreas 1 e 3, as quais, de acordo com os resultados das análises botânicas, apresentaram maior grau de impacto ambiental. Nessas áreas, os parâmetros de massa fresca foliar, massa seca foliar e conteúdo de água foram menores, enquanto os valores de área foliar específica foram maiores. Tais alterações estruturais indicam uma possível resposta adaptativa da espécie ao estresse ambiental, possivelmente ocasionado pela presença de poluentes atmosféricos.

A utilização de plantas bioindicadoras, aliada a metodologias de análise química e botânica, revelou-se um instrumento eficiente e de baixo custo para monitoramento do ar em ambiente urbano, permitindo diagnósticos sobre a qualidade do ar e a origem das partículas em suspensão (atividades industriais, tráfego veicular, queima de resíduos e influência de massas de ar oceânicas, dentre outras).

Como perspectiva futura, recomenda-se o aprofundamento deste estudo, preferencialmente com a participação de universidades localizadas nas proximidades da área de amostragem, a fim de viabilizar campanhas de monitoramento periódicas e contínuas. A ampliação da rede de pesquisa e o fortalecimento de parcerias institucionais poderão contribuir para a obtenção de dados mais representativos e para o aprimoramento das análises, promovendo maior consistência e continuidade às investigações desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

- Amaral, C. H. C. de. (2021). *UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA RESIDENTES PRÓXIMAS A ÁREAS INDUSTRIAIS* :
- Ávila, S. G. de. (2010). *Determinação de íons solúveis em água no material particulado MP 10 coletado na Cidade Determinação de íons solúveis em água no material particulado MP 10 coletado na Cidade Universitária – São Paulo , 2003.*
- 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., Maria Fernanda C. Quijanao, E. P. S. J., Ventura, L. M. B., & Adriana, G. (2021). *Revisão*. 44(6), 737–754.
- Bilenki Junior, V., Auer, C. G., & Wolf II, N. I. (2021). CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E FISIOLÓGICAS DE ISOLADOS DE *Colletotrichum* ASSOCIADOS À ANTRACNOSE DA ERVA-MATE. *BIOFIX Scientific Journal*, 6(2), 120. <https://doi.org/10.5380/biofix.v6i2.78851>
- Bonatti-Chaves, M., Macalossi, J., Cabral, R. D. C., Dias dos Santos, M., Pfundner, P., Bonatti, M., Sieber, S., Medeiros, S. H. W., Mougá, 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>
- Brito, P. H. F. de, Araújo, R. dos S., & Marinho, G. (2018). Composição Química Do Material Particulado Atmosférico: Uma Revisão De Literatura. *Holos*, 4, 62–74. <https://doi.org/10.15628/holos.2018.4648>
- Bruno, R. L. (2005). *Material Particulado Atmosférico na Cidade de São Carlos-SP: quantificação e identificação de fontes*. 187.
- 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>
- Carvalho, P. E. Ra. (2003). Espécies Arbóreas Brasileiras - Erva-Mate *Ilex paraguariensis*. *Espécies Arbóreas Brasileiras*, 1.
- Catanduvas, M. de. (2024). *Município de Catanduvas*. <https://catanduvas.sc.gov.br/pagina-2623/>
- Cavallaro, R., De Melo Júnior, J. C. F., 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. *AVALIAÇÃO DO*

- EFEITO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM POPULAÇÕES URBANAS DE INGA EDULIS MART. (FABACEAE) POR MEIO DO MÉTODO DE BIOMONITORAMENTO PASSIVO*, 104–126.
- Curtt, F. F. (2019). *ESTIMATIVA DE ÁREA FOLIAR NA CULTURA DA SOJA USANDO OS MÉTODOS DE DIMENSÕES FOLIARES E IMAGENS DIGITAIS*. 1–9.
- Da Silva, L. C. M. (2021). *Caracterização química do material particulado atmosférico (MP 10) do Distrito Federal*.
- Dos Santos, F. S., Pinto, J. A., Maciel, F. M., Horta, F. S., Albuquerque, T. T. de A., & Andrade, M. de F. (2019). Evaluation of meteorological conditions influence on fine particulate matter (Pm2.5) concentration in Belo Horizonte, MG, Brazil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(2), 371–381. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019174045>
- 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>
- Freitas, A. de M., & Solci, M. C. (2009). Caracterização do MP10 e MP2,5 e distribuição por tamanho de cloreto, nitrato e sulfato em atmosfera urbana e rural de Londrina. *Química Nova*, 32(7), 1750–1754. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422009000700013>
- Gajbhiye, T., Pandey, S. K., & Kim, K. (2022). *Foliar Uptake of Toxic Metals Bound to Airborne Particulate Matter in an Urban Environment*. August. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220050>
- Gemelli, V., Ardiles, L. G., & Martins, A. N. (2024). *POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA : ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MUNICÍPIO DE BRUSQUE - SC 1 AIR POLLUTION : SOME CONSIDERATIONS ABOUT THE MUNICIPALITY OF BRUSQUE – SC* Introdução O espaço geográfico é resultante da interação entre sociedade e natureza , sendo fruto d. 9 –31.
- Gil, A. C. (2022). *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*.
- Guia, N. B. da. (2024). *MONITORIZAÇÃO PASSIVA DE POLUENTES GASOSOS NA ÁREA METROPOLITANA DE LUANDA , ANGOLA*. <https://doi.org/10.54499/2022.04240.PTDC>
- 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>
- Marques Torres, L., Di Paula da Silva Pinheiro, C., Dias Azevedo, S., Rick Soares Rodrigues, P., &

- Prissila Reis Sandim, D. (2020). Poluição atmosférica em cidades brasileiras: uma breve revisão dos impactos na saúde pública e meio ambiente. *Naturae*, 2(1), 23–33.
<https://doi.org/10.6008/cbpc2674-6441.2020.001.0003>
- Martins, I. L., Paula, A., Pezzin, T., Helena, S., Medeiros, W., & De, J. C. F. (2025). *Árvores urbanas na sinalização de alterações na qualidade do ar Urban trees in signaling changes in air quality*. 00(0000).
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. (2024). *Relatório Anual De Acompanhamento Da Qualidade Do Ar*. <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/qualidade-ambiental-e-meio-ambiente-urbano/qualidade-do-ar/relatorio-anual-2023>
- Miranda, M. W. V. de, Karnopp, E., Barp, G. D., Maia, B. G. de O., Pezzin, A. P. T., Júnior, J. C. F. de M., & Chaves, M. B. (2024). *Avaliação do efeito da poluição atmosférica, em termos de concentração de material particulado foliar, sobre o bioindicador Schinus terebinthifolia*.
- OMS. (2017). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. *Universitas Nusantara PGRI Kediri*, 01, 1–7.
- Popek, R., Łukowski, A., Roy, A., Mandal, M., Przybysz, A., Zajac, 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. da S. (2022). *ESTUDO DOS PRINCIPAIS ÍONS SOLÚVEIS EM ÁGUA PRESENTES EM MATERIAL PARTICULADO (MP10) COLETADO NA REGIÃO URBANA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ*. 9, 356–363.
- 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*. August, 1–43.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. del P. B. (2013). *Metodologia de Pesquisa*.
https://toaz.info/doc-view-3#google_vignette
- Santos, G. S. dos, Santos, M. D. dos, Melo Junior, J. C. F. de, Chaves, M. B., Mougá, 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., Junior, N. C. R., & Galvão, E. S. (2022). Material Particulado na atmosfera urbana e suas interações com a saúde humana. In *Editora 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>

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*. 1–28.

Tepanosyan, G., Baldacchini, C., & Sahakyan, L. (2021). Revealing soil and tree leaves deposited particulate matter PTE relationship and potential sources in urban environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(19).

<https://doi.org/10.3390/ijerph181910412>

Vormittag, E. D. M. P. A. D. A., Cirqueira, S. S. R., Neto, H. W., & Saldiva, P. H. (2021). Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. *Estudos Avancados*, 35(102), 7–30.

<https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>

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>

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, 1772–1790.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.124>

APÊNDICE A

TERMO DE ORIGINALIDADE E DE USO OU NÃO USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) PARA ENTREGA DA DISSERTAÇÃO PARA DEFESA

Eu, Beatriz Chinato Begnini Casagrande, estudante do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos em forma associativa entre UNIPLAC, UNC, UNESC e UNIVILLE, declaro, para os devidos fins, que a minha dissertação, intitulada ***Ilex paraguariensis (ERVA-MATE) COMO BIOINDICADORA DA QUALIDADE DO AR E DE POSSÍVEIS FONTES DE EMISSÃO DE POLUENTES EM CATANDUVAS, SC***, foi desenvolvido exclusivamente por mim, resultado de pesquisa original e que todas as fontes utilizadas estão devidamente citadas e referenciadas segundo as normas definidas pelo Programa.

E quanto ao Uso de Inteligência Artificial (IA) Regenerativa ou Instrumentos Assistidos de Outros Tipos/Classificações (por Capacidade, Funcionalidade,):

() Declaro que NÃO UTILIZEI quaisquer instrumentos de Inteligência Artificial (IA), de qualquer tipo, mas não se limitando a modelos de linguagem generativos (como ChatGPT, Bard, etc.), ferramentas de geração de imagens, áudio, vídeo ou código, ou qualquer outra tecnologia baseada em IA, em qualquer etapa da concepção, desenvolvimento, escrita ou revisão desta Dissertação. Todo o conteúdo e ideias apresentados são de minha autoria exclusiva, baseada na literatura que apoiou o desenvolvimento desta pesquisa.

(x) Declaro que UTILIZEI instrumentos de Inteligência Artificial (IA) no desenvolvimento desta Dissertação, primando pelo uso responsável, de forma ética e transparente, de acordo com as etapas abaixo indicadas. A supervisão e a autoria intelectual de todo o trabalho permanecem de minha responsabilidade exclusiva.

() **Concepção do Estudo/Pesquisa/Problema, Justificativa:**

() Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

() Finalidade:

() Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

(x) **Panorama teórico:**

(x) Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

ChatPDF e Chatgpt

() Finalidade:

Busca de artigos e tradução

() Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

() **Metodologia da Pesquisa:**

() Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

() Finalidade:

() Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

() **Coleta, Análise, Resultados, Discussão e Interpretação de Dados:**

() Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

() Finalidade:

() Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

(x) **Melhoria da Linguagem e Revisão de Texto:**

(x) Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

Chatgpt

() Finalidade:

Correção ortográfica e organização lógica do texto.

() Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

Declaro que estou ciente da necessária integridade da pesquisa acadêmica e que a utilização de instrumentos de Inteligência Artificial deve ser declarada e eventualmente utilizada de forma complementar e auxiliar meu trabalho, sem comprometer a originalidade e a autoria intelectual da Dissertação. Por tudo isso, eu assumo integralmente a responsabilidade pelo conteúdo final apresentado e por esta declaração, de acordo com as estipulações legais e responsabilidades que regulam esta matéria.

Declaro, ainda, que não utilizei trabalho de outros autores sem a devida menção, nem reproduzi, integral ou parcialmente, trabalhos de terceiros. As ideias e interpretações apresentadas são de minha inteira responsabilidade

Lages/SC 19/11/2025.

Código e Assinatura do Estudante
CPF: 087.891759-48



Documento assinado digitalmente

BEATRIZ CHINATO BEGNINI CASAGRANDE

Data: 19/11/2025 10:38:06-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>