

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA
SOUZA ETEC CEL. FERNANDO FEBELIANO DA COSTA
Ensino Médio com Habilitação Profissional Técnica em Meio
Ambiente**

**Anna Julia Araújo Boscariol
Francisco Alves de Farias Neto
Laura Crispim Coelho Barbosa
Melissa Mariano**

**LIQUENS COMO BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO AR NO
MUNICÍPIO DE PIRACICABA (SP)**

PIRACICABA – SP

2025

**Anna Julia Araújo Boscariol
Francisco Alves de Farias Neto
Laura Crispim Coelho Barbosa
Melissa Mariano**

**LIQUENS COMO BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO AR NO
MUNICÍPIO DE PIRACICABA (SP)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso Técnico em Meio Ambiente da Etec Cel. Fernando Febeliano da Costa, orientado pelos professores Bianca Furlan Danelon e Rafael de Souza, como requisito parcial para obtenção do título de técnico em meio ambiente.

PIRACICABA – SP

2025

RESUMO

Este trabalho analisa a utilização de Líquens como bioindicadores da qualidade do ar no município de Piracicaba (SP). A poluição atmosférica, considerada pela Organização Mundial da Saúde como um dos maiores desafios ambientais e de saúde pública da atualidade, ainda carece de monitoramento abrangente em muitas cidades brasileiras. Nesse contexto, os Líquens apresentam-se como alternativa viável aos métodos físico-químicos convencionais, que possuem alto custo e baixa cobertura espacial. A pesquisa foi realizada em diferentes áreas do município, incluindo zonas industriais, urbanas e de preservação ambiental, com a coleta e análise de Líquens em campo e em laboratório. Os resultados apontaram variações significativas na diversidade e abundância desses organismos, com baixa ocorrência em áreas industriais e elevada presença em regiões preservadas, evidenciando a influência direta da poluição atmosférica sobre sua distribuição. O estudo comprova a eficácia dos Líquens como bioindicadores e reforça sua importância como ferramenta complementar de biomonitoramento. Além de fornecer subsídios para diagnósticos ambientais e formulação de políticas públicas, o trabalho contribui para a conscientização sobre os impactos da poluição do ar, destacando a necessidade de integrar metodologias acessíveis ao planejamento urbano e industrial. A pesquisa também demonstra que o biomonitoramento com Líquens é de baixo custo, fácil aplicação e adequado para municípios que não dispõem de infraestrutura laboratorial robusta, fortalecendo práticas sustentáveis e preventivas voltadas à saúde humana e à biodiversidade.

Palavras-chave: bioindicadores; líquens; poluição atmosférica; qualidade do ar; biomonitoramento.

ABSTRACT

This study analyzes the use of lichens as bioindicators of air quality in the municipality of Piracicaba (SP), Brazil. Atmospheric pollution, recognized by the World Health Organization as one of today's greatest environmental and public health challenges, still lacks comprehensive monitoring in many Brazilian cities. In this context, lichens emerge as a viable alternative to conventional physicochemical methods, which are costly and have limited spatial coverage. The research was conducted in different areas of the city, including industrial, urban, and preserved zones, through field collection and laboratory analysis of lichens. The results revealed significant variations in lichen diversity and abundance, with low occurrence in industrial areas and high presence in preserved regions, highlighting the direct influence of atmospheric pollution on their distribution. The study confirms the effectiveness of lichens as bioindicators and reinforces their relevance as a complementary biomonitoring tool. Beyond supporting environmental assessments and the development of public policies, the research contributes to raising awareness of the impacts of air pollution, emphasizing the need to integrate accessible methodologies into urban and industrial planning. Furthermore, the study demonstrates that lichen biomonitoring is low-cost, easy to apply, and suitable for municipalities lacking robust laboratory infrastructure, thus strengthening sustainable and preventive practices aimed at protecting human health and biodiversity.

Keywords: bioindicators; lichens; air pollution; air quality; biomonitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Líquens crostosos na Rua do Rosário	18
Figura 2: Saco de papel com líquens crostosos coletados na Rua do Rosário.....	18
Figura 3: Diferentes líquens crostosos	19
Figura 4: Líquens crostosos à margem do rio	19
Figura 5: Líquens foliosos a margem do Rio Piracicaba.....	19
Figura 6: Saco de papel com líquens foliosos a margem do Rio Piracicaba	19
Figura 7: Árvore com líquens na praça da Biblioteca Municipal.....	20
Figura 8: Líquens crostosos coletados na praça da Biblioteca Municipal.....	20
Figura 9: Coleta de líquens crostosos na Unileste.....	20
Figura 10: Árvore com líquens crostosos na Unileste.....	20
Figura 11: Árvore com líquens no Horto Florestal de Tupi	21
Figura 12: Placa de entrada do Horto Florestal de Tupi	21
Figura 13: Placa de Petri para cultivo dos líquens coletados	22
Figura 14: Cultivo do líquen crostoso da praça da Biblioteca Municipal	22
Figura 15: Cultivo do líquen folioso da Rua do Rosário.....	22
Figura 16: Cultivo do líquen folioso 2	23
Figura 17: Cultivo do líquen folioso.....	23
Figura 18: Líquen cultivado sob microscópio óptico	23
Figura 19: Líquen cultivado sob microscópio óptico 2	23
Figura 20: Localização de Piracicaba no Estado de São Paulo	24
Figura 21: Confecção do "reticulum"	26
Figura 22: Confecção do "reticulum"2	26
Figura 23: Mapa de biomonitoramento da Área 1	27
Figura 24: Reticulum posicionado na árvore 1	28
Figura 25: Reticulum posicionado a 1,50m do solo	28
Figura 26: Líquens crostosos na primeira árvore da área 1	29
Figura 27: Percevejo <i>Andrallus spinidens</i>	29
Figura 28: Líquen escuro (<i>Leptogyum cyanescens</i>).....	29
Figura 29: Reticulum posicionado na árvore 2, área1	29
Figura 30: Medida da circunferência do tronco para calcular o diâmetro da árvore 2 da área1	29

Figura 31: Reticulum posicionado na terceira árvore.....	30
Figura 32 Reticulum posicionado na árvore 3, área1	30
Figura 33: Medida da circunferência da árvore 3, área 1	30
Figura 34: Reticulum posicionado a 1,50m do solo	31
Figura 35: Reticulum posicionado na árvore 4.....	31
Figura 36: Líquens escuros na árvore 5.....	32
Figura 37: Reticulum posicionado na árvore 5.....	32
Figura 38: Medida da circunferência do tronco da árvore 6	32
Figura 39: Reticulum posicionado na árvore 6.....	32
Figura 40: Mapa de biomonitoramento da área 2	34
Figura 41: Mapa de pontos de referência da área 2.....	34
Figura 42: Reticulum posicionado na árvore 1.....	35
Figura 43: Reticulum posicionado a 45cm do solo na árvore 1	35
Figura 44: Líquens foliosos na árvore 1	36
Figura 45: Reticulum posicionado na árvore 2.....	37
Figura 46: Medida de 60cm do solo na árvore 2.....	37
Figura 47: Reticulum posicionado na árvore 3.....	37
Figura 48: Líquens da árvore 3 molhados.....	37
Figura 49: Reticulum posicionado na árvore 6.....	38
Figura 50: Reticulum posicionado na árvore 5.....	38
Figura 51: Reticulum posicionado na árvore 4.....	38
Figura 52: Mapa de biomonitoramento da área 3	39
Figura 53: Mapa de pontos de referência da área 3.....	39
Figura 54: Líquens crostosos molhados na árvore 1	40
Figura 55: Reticulum posicionado na árvore 1.....	40
Figura 56: Reticulum posicionado na árvore 2.....	40
Figura 57: Medida de 110cm do solo na árvore 2.....	40
Figura 58: Reticulum posicionado na árvore 3.....	41
Figura 59: Reticulum posicionado na árvore 4.....	41
Figura 60: Reticulum posicionado na árvore 6.....	41
Figura 61: Reticulum posicionado na árvore 5.....	41
Figura 62: Líquens crostosos molhados da árvore 5.....	41
Figura 63: Mapa de biomonitoramento do Horto de Tupi	43
Figura 64: Reticulum posicionado no pinheiro	44

Figura 65: Casca do pinheiro	44
Figura 66: Reticulum posicionado a 125cm do solo na árvore 1	44
Figura 67: Reticulum posicionado na árvore 1	44
Figura 68: Reticulum posicionado na árvore 2	45
Figura 69: Medida de 110cm do solo na árvore 2	45
Figura 70: Medida de 125cm do solo na árvore 3	45
Figura 71: Reticulum posicionado na árvore 3	45
Figura 72: Medida de 120cm do solo na árvore 4	46
Figura 73: Reticulum posicionado na árvore 4	46
Figura 74: Reticulum posicionado na árvore 5	46
Figura 75: Medida de 149cm do solo na árvore 5	46
Figura 76: Medida de 120cm do solo na árvore 6	47
Figura 77: Reticulum posicionado na árvore 6	47
Figura 78: Líquens fruticulosos.	47
Figura 79: Líquens crostosos vermelhos	48
Figura 80: Fórmula de IPA	49
Figura 81: Classificações de qualidade do ar	50
Figura 82: Tabela de resultados do biomonitoramento	50
Figura 83: Líquen folioso	53
Figura 84: Líquen folioso	53
Figura 85: Líquen microfolioso sendo coletado	54
Figura 86: Líquen microfolioso	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Objetivos	6
2. DESENVOLVIMENTO	8
2.1. Poluição Atmosférica: Contexto Global e Nacional	8
2.2. A Qualidade do Ar em Piracicaba (SP)	8
2.3. Métodos Convencionais de Monitoramento e Seus Desafios	9
2.4. Líquens como Bioindicadores da Poluição Atmosférica	10
2.4.1. Metodologias de Biomonitoramento com Líquens	12
2.4.2. Vantagens e Limitações	13
2.5. Exemplos de Aplicação em Campo	13
2.6. Legislação e Políticas de Monitoramento Ambiental	14
2.7. Desafios e Perspectivas	15
3. METODOLOGIA DA PESQUISA	17
3.1. Coleta e Cultivo de Líquens	18
3.2. Biomonitoramento em Campo	24
3.2.1. Caracterização do município de Piracicaba	24
3.2.2. Contextualização	25
3.2.3. Área 1 - Praça "Cacilda de Azevedo Cavaggione" (Praça da Biblioteca Municipal)	27
3.2.4. Área 2 - Ao longo da Av. Beira Rio	33
3.2.5. Área 3 – Distrito industrial Unileste	38
3.2.6. Área 4 – Horto Florestal de Tupi	42
3.2.7. Análise de Dados	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. Observações em Campo	52
4.2. Comparação Morfológica com Imagens de Referência	53

4.3. Interpretação dos Resultados	54
5. CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

A qualidade do ar é um dos aspectos ambientais mais diretamente relacionados à saúde humana, com a poluição atmosférica sendo responsável por cerca de sete milhões de mortes prematuras por ano, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021). Ainda assim, esse fator ambiental é um dos menos monitorados na maior parte do território brasileiro. Fora dos grandes centros urbanos, a ausência de políticas públicas robustas e de sistemas eficazes de medição atmosférica — como apontado em levantamentos do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2024) sobre o dimensionamento da rede básica de monitoramento da qualidade do ar no Brasil — contribui para uma percepção distorcida do problema, sugerindo que a poluição do ar não constitui uma prioridade perceptível nessas localidades. Nesse cenário, o uso de organismos bioindicadores, como os líquens, representa uma alternativa científica viável e acessível para preencher essa lacuna de informação, conforme demonstrado em estudos realizados em Itabira/MG e Uberlândia/MG (COSTA *et al.*, 2020; GONÇALVES *et al.*, 2007; CARNEIRO, 2004; NASH III, 1996).

De acordo com Thomas Hawkes Nash III, em seu livro "Lichen Biology", líquens são organismos simbióticos compostos por um fungo (micobionte) e um ou mais parceiros fotossintetizantes (fotobionte), que podem ser algas verdes ou cianobactérias. Em alguns casos, essa associação simbiótica pode incluir três ou mais organismos, formando relações ecológicas complexas e ainda pouco compreendidas. Esses organismos, altamente adaptados a diferentes ambientes, demonstram uma notável capacidade de resposta às mudanças na atmosfera, especialmente às causadas pela poluição do ar.

A contaminação atmosférica, também chamada de poluição do ar, ocorre quando as características naturais da atmosfera são modificadas pela liberação de gases, partículas sólidas ou agentes biológicos. Esse fenômeno é predominantemente resultado das atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis por veículos, além dos processos industriais e da operação de usinas, embora não se restrinja a esses fatores.

Estima-se que atualmente cerca de 50% da população mundial habita em cidades e aglomerados urbanos podendo estar sujeitas a níveis crescentes de poluentes do ar. Dentre as matérias consideradas poluentes atmosféricos, destacam-se os gases e material particulado proveniente, sobretudo de

fontes antrópicas, como os veículos automotores e as indústrias. (TORRES, *et al.*, 2020).

Um exemplo relevante ocorreu na semana de 20 a 24 de maio de 2025, quando o Índice de Qualidade do Ar (IQA) em Piracicaba foi classificado como “ruim”, segundo o site AccuWeather, com registros médios de 58, dentro da faixa considerada prejudicial à saúde (classificação “ruim” varia de 50 a 99). Segundo o próprio site, “o ar atingiu um nível de poluição elevado e não é saudável para grupos sensíveis”. As recomendações envolvem reduzir o tempo destinado às atividades ao ar livre caso estejam presentes sintomas como dificuldade de respiração ou irritação na garganta (ACCUWEATHER, 2025). Esse dado reforça a urgência em monitorar os impactos da poluição atmosférica, especialmente em regiões urbanas, visto que, para ser considerado ao menos “razoável”, o índice deveria estar entre 20 e 49.

Esse cenário pode ser explicado principalmente pelo intenso tráfego de veículos automotores, uma das maiores fontes de poluição atmosférica nas cidades brasileiras. Estudos mostram que o setor veicular responde por emissões significativas de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e material particulado (MP), especialmente em suas frações MP_{2,5} e MP₁₀, que correspondem, respectivamente, a partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 micrômetros e menor que 10 micrômetros. Esses poluentes são liberados tanto pelo escapamento quanto pelo desgaste de pneus e freios, além da ressuspensão do solo (VASQUES, 2021). Soma-se a isso a presença de atividades industriais, a ocorrência de queimadas sazonais na região e as condições climáticas adversas, como períodos de seca e episódios de inversão térmica, que dificultam a dispersão desses poluentes. Segundo a CETESB (2023), a inversão térmica é um fenômeno natural que ocorre quando uma camada de ar quente se posiciona sobre uma camada de ar frio próxima ao solo, impedindo a ascensão dos poluentes e resultando em sua concentração em níveis prejudiciais à saúde. Dessa forma, a poluição atmosférica observada em Piracicaba resulta da combinação entre atividades antrópicas e fatores ambientais, o que reforça a importância de métodos de monitoramento, como o uso de líquens como bioindicadores, para compreender seus impactos na saúde e no meio ambiente.

A qualidade do ar nas áreas urbanas tende a apresentar concentrações indesejáveis de contaminantes, sem que haja um sistema abrangente de monitoramento, dada à sofisticação e aos custos elevados dos métodos físico-

químicos tradicionais, que podem ser minimizados pela adoção complementar do biomonitoramento, segundo Carneiro (2004). Esse método é realizado por meio de bioindicadores, que são organismos vivos capazes de refletir as condições ambientais de um determinado local. Os líquens são amplamente reconhecidos por sua alta sensibilidade à poluição atmosférica, o que tem favorecido seu uso crescente como bioindicadores da qualidade ambiental. Este estudo busca analisar a relação entre a presença de líquens e a qualidade do ar, considerando sua distribuição e adaptação em diferentes locais. Essa escolha baseia-se na acessibilidade dos líquens e na sua capacidade de absorver diretamente substâncias do ar, acumulando poluentes ao longo do tempo.

Considerando essas condições, optou-se por este tema considerando que a poluição atmosférica é uma das principais preocupações ambientais da atualidade, pois afeta diretamente a saúde humana, a biodiversidade e os ciclos naturais dos ecossistemas. Entre as diversas técnicas disponíveis, que exigem equipamentos sofisticados e análises laboratoriais, os líquens oferecem uma alternativa acessível e de baixo custo, permitindo o monitoramento da qualidade do ar. A eficiência desse método já foi comprovada em diversos estudos, pois a presença, ausência ou variação na diversidade dos líquens refletem os níveis de poluentes no ar.

Nesse projeto serão comparadas áreas com diferentes níveis de poluição dentro dos limites do município de Piracicaba/SP, abrangendo locais próximos a polos industriais, centro urbano e áreas de preservação ambiental. Com isso, será possível compreender melhor a distribuição da poluição e validar a eficácia desse método de biomonitoramento.

A pesquisa é fundamentada em teorias ambientais e estudos já realizados sobre biomonitoramento, permitindo a construção de uma base teórica sólida para a análise dos dados coletados. Espera-se que os resultados confirmem a eficiência dos líquens como indicadores biológicos da poluição atmosférica e reforcem a importância do seu uso em estratégias de monitoramento ambiental. Além disso, a investigação poderá contribuir para futuras pesquisas na área e para a conscientização sobre a necessidade de reduzir a emissão de poluentes, ampliando a compreensão sobre a importância do monitoramento atmosférico sistemático.

No artigo escrito por Martins, Käffer e Lemos (2008), os líquens são destacados como bioindicadores altamente sensíveis a poluentes atmosféricos, como dióxido de

enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e metais pesados, e sua capacidade de detectar alterações ambientais precocemente é ressaltada como uma ferramenta eficaz e sustentável para o monitoramento da qualidade do ar, complementando métodos tecnológicos mais caros e invasivos e contribuindo para estratégias de mitigação ambiental.

Dessa forma, a questão central deste estudo é: qual é a qualidade do ar em Piracicaba, considerando diferentes áreas do município? Além de demonstrar que o biomonitoramento por líquens é um método acessível e eficaz, buscamos identificar possíveis variações na poluição atmosférica entre regiões industriais, urbanas e de preservação ambiental no município.

O projeto apresenta potencial contribuição para políticas públicas voltadas ao controle da poluição atmosférica e à conservação de ecossistemas. Além disso, favorece ações educativas por meio do envolvimento de comunidades e instituições de ensino em práticas de monitoramento ambiental. Também oferece viabilidade econômica ao propor alternativas que podem auxiliar na redução de custos com licenciamentos e avaliações de impacto. Destaca-se ainda pela atenção a espécies de líquens presentes em biomas menos explorados e pelo uso da identificação morfológica como abordagem central na análise.

A aplicabilidade dos resultados obtidos pode estender-se à formulação de regulamentações ambientais, ao incentivo de práticas sustentáveis no setor industrial e à adoção de medidas voltadas à saúde preventiva. Nesse sentido, o estudo contribui com subsídios acessíveis e eficazes para lidar com os desafios impostos pela poluição atmosférica e para fomentar iniciativas em prol da sustentabilidade.

1.1. Objetivos

Objetivo geral

Examinar a qualidade do ar no município de Piracicaba por meio do biomonitoramento de líquens, utilizados como indicadores biológicos da poluição atmosférica.

Objetivos específicos

- Selecionar áreas representativas para coleta de Líquens em Piracicaba;
- Realizar a contagem e coleta de Líquens bioindicadores para posterior análise;
- Comparar os índices de pureza do ar entre regiões industriais, urbanas e de preservação;
- Avaliar a eficácia do biomonitoramento com Líquens;
- Mapear as áreas analisadas no município;
- Criar um folder informativo com os dados obtidos e propostas de melhoria da qualidade do ar para divulgação de informações e conscientização.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Poluição Atmosférica: Contexto Global e Nacional

A poluição do ar é reconhecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como um dos maiores desafios de saúde pública global, sendo responsável por cerca de sete milhões de mortes prematuras anualmente segundo a publicação “*WHO Global Air Quality Guidelines*”, de 2021. Esse problema atinge tanto áreas urbanas quanto rurais, afetando diretamente a saúde humana, a biodiversidade e os ciclos climáticos. Em nível global, observa-se desigualdade no monitoramento atmosférico: países desenvolvidos mantêm redes densas de estações de medição, enquanto muitas nações em desenvolvimento — normalmente em zonas rurais e cidades de médio porte — dispõem de dados escassos ou inexistentes. Essa desigualdade mundial pode ser tanto observada em sites como o World Air Quality Index ou o próprio Google Maps, que apresentam dados globais de qualidade do ar, quanto em estudos que relacionam a qualidade do ar às condições de pobreza de diferentes países (RENTSCHLER, *fi.* 2023; SMITH, *et al.* 2024), além dos dados de relatórios do IQAir de 2023, que apelam para um melhor monitoramento da qualidade do ar global.

No Brasil, essa realidade se materializa na concentração de estações em regiões metropolitanas, deixando amplas áreas do interior sem avaliação sistemática. A ausência de informações confiáveis compromete a formulação de políticas públicas e limita o controle efetivo da poluição, como destacado no relatório do Instituto de Energia e Meio Ambiente (2024) sobre o dimensionamento da rede básica de monitoramento da qualidade do ar no Brasil.

2.2. A Qualidade do Ar em Piracicaba (SP)

Piracicaba, município do interior paulista, caracteriza-se por intensa atividade industrial — sobretudo no setor sucroalcooleiro (TERCI, 2009; EMERIQUE, 2015) — e elevado tráfego veicular, evidenciado por diagnóstico da OSCIP Pira 21, citado pelo portal *Mobilize Brasil* (2014), que apontou crescimento de 66% na circulação de

automóveis em Piracicaba em oito anos, impactando a mobilidade urbana. Essas fontes antrópicas, somadas a condições climáticas que favorecem a estagnação do ar, resultam em episódios recorrentes de poluição. Entre 20 e 24 de maio de 2025, o Índice de Qualidade do Ar (IQA) divulgado pelo AccuWeather atingiu média de 58, classificando-se como “ruim” e indicando risco para grupos sensíveis. Embora o município observe os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 e por normativas estaduais e municipais (Decreto Estadual nº 59.113/2013 e Lei Complementar nº 251/2010 de Piracicaba), a carência de estações locais de monitoramento contínuo impede a análise de padrões sazonais e a identificação de áreas críticas, além de dificultar respostas rápidas e direcionadas a eventos agudos (IEMA, 2024).

2.3. Métodos Convencionais de Monitoramento e Seus Desafios

Os métodos convencionais utilizados para avaliar a qualidade do ar são fundamentados em análises físico-químicas, que incluem técnicas como cromatografia gasosa, espectrometria de absorção atômica e gravimetria. Esses procedimentos permitem quantificar com alta precisão gases poluentes — como dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO) — além de material particulado (MP), representado pelas frações MP_{10} (partículas inaláveis com diâmetro igual ou inferior a 10 micrômetros) e $\text{MP}_{2,5}$ (partículas finas com diâmetro igual ou inferior a 2,5 micrômetros), e metais pesados. Embora sejam métodos consolidados e fundamentais para a obtenção de dados exatos, sua aplicação enfrenta desafios significativos.

Esses sistemas exigem infraestrutura robusta, laboratórios especializados, equipamentos de alto custo e profissionais altamente qualificados. Além disso, demandam energia elétrica constante e manutenção periódica, fatores que limitam sua implementação em larga escala, especialmente em municípios de médio e pequeno porte, como Piracicaba. Na prática, essa dependência tecnológica gera lacunas no monitoramento, particularmente em regiões que não possuem redes fixas de estações ou que não conseguem arcar com os custos operacionais.

Outra limitação desses métodos reside na sua baixa cobertura espacial. As estações fixas de monitoramento, embora precisas no ponto em que estão localizadas, não captam as variações microclimáticas e espaciais que ocorrem dentro de um município, sobretudo em áreas periféricas ou de expansão urbana. Dessa forma, eventos pontuais de poluição podem passar despercebidos, comprometendo a efetividade de políticas públicas de controle da qualidade do ar, como as relacionadas ao controle de emissões, ao planejamento urbano e a ações preventivas em saúde pública.

Ademais, o tempo necessário entre a coleta, a análise laboratorial e a divulgação dos resultados pode ser longo, dificultando respostas rápidas a episódios críticos de poluição. Essa limitação operacional evidencia a necessidade de complementar os métodos tradicionais com estratégias mais acessíveis e de maior cobertura espacial, como o biomonitoramento por líquens. Nesta metodologia, os líquens atuam como sensores biológicos integrados, utilizando o forófito (o substrato, geralmente a árvore, sobre o qual o líquen se fixa) como suporte natural para sua instalação e desenvolvimento. Embora não substitua as medições físico-químicas, o biomonitoramento oferece um bom panorama da qualidade atmosférica ao longo do tempo e do espaço, podendo subsidiar as políticas públicas ao complementar os dados das estações convencionais e indicar áreas críticas que demandam intervenção, conforme destacado por Conti e Cecchetti (2001), que reconhecem essa ferramenta como eficaz e de baixo custo para orientar medidas ambientais.

2.4. Líquens como Bioindicadores da Poluição Atmosférica

Diante das limitações dos métodos convencionais, faz-se necessária uma avaliação mais abrangente da qualidade do ar por meio de ferramentas complementares. Assim, os líquens se destacam como bioindicadores eficientes, oferecendo uma alternativa de baixo custo, ampla cobertura espacial e integração temporal.

Os líquens são associações simbióticas entre fungos (micobiontes) e algas verdes ou cianobactérias (fotobiontes). Anatomicamente, não possuem estruturas como cutícula ou estômatos, o que permite a absorção direta da água, dos nutrientes

e também dos poluentes da atmosfera pelos talos. Essa morfologia singular faz com que compostos tóxicos inalados permaneçam retidos no talo, sem vias de excreção. Por isso, “dentre os diversos bioindicadores de poluição atmosférica, os líquens são considerados eficientes, estando entre os organismos vivos mais utilizados para esse fim, em função de uma série de características que os favorecem” (COSTA, 2018). Dentre essas características destacam-se ampla distribuição geográfica, nutrição exclusivamente aérea e crescimento lento, o que permite absorver poluentes continuamente ao longo do ano.

Além de sua função como bioindicadores, destacam-se também por seu papel fundamental nos ecossistemas, sendo pioneiros na sucessão ecológica, capazes de colonizar superfícies inóspitas e sobreviver a condições ambientais extremas como apontado no estudo de Honda e Vilegas (1998) quando se explica que líquens “podem, também, ser encontrados em desertos onde a temperatura é bastante variável, e em regiões polares com temperaturas extremamente baixas.” Essa resiliência está ligada à complexidade de sua simbiose, como discutida por Nash III (1996), que pode envolver mais de três organismos distintos – tema desenvolvido em estudos atuais, a exemplo de Tagirdzhanova *et al.* (2025) – e tão bem integrados que frequentemente são confundidos com um único ser vivo, o que os torna biologicamente notáveis.

Historicamente, o uso de líquens em monitoramento atmosférico é antigo. No século XIX, William Nylander observou que líquens eram raros nas áreas urbanas de Paris, sugerindo seu uso como um indicador de saúde ambiental (VITIKAINEN, 2009). Por volta de 1866, Nylander havia evidenciado o desaparecimento de líquens no local, em seu estudo Jardim de Luxemburgo (NYLANDER, 1866 *apud* FUGA, 2006), e suas contribuições são destacadas na literatura como pioneiras na área. Na América Latina, o primeiro uso documentado ocorreu em 1953, no estudo de Vareschi em Caracas, Venezuela, que foi repetido e ampliado em 1973 por Vareschi e Moreno (MEDINA *et al.*, 2013).

No Brasil, pesquisas iniciais surgiram na década de 1970, com aplicações educacionais em São Paulo, e se consolidaram nos anos 2000 em estudos formais, como o trabalho de Martins *et al.* (2008) em Porto Alegre, que utilizou *Parmotrema tinctorum* e *Teloschistes exilis* para testar metais pesados em ambientes urbanos. Desde então, diversas instituições brasileiras — incluindo CETESB/USP, UFPR e

UFSCar — adotaram líquens em projetos de biomonitoramento, expandindo seu uso para cidades como São Paulo e Curitiba. Essas contribuições históricas mostram a evolução da líquenologia de campo até as atuais aplicações práticas de monitoramento ambiental.

De fato, estudos ressaltam que “os líquens são reconhecidos por serem muito sensíveis à poluição atmosférica e, desde o século 19, são utilizados como bioindicadores” (MARTINS *et al.*, 2008). Muitas espécies de líquens reagem intensamente a compostos como SO₂, (NO_x), material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}) e metais pesados, típicos da poluição industrial e urbana. Assim, alterações na estrutura da comunidade líquênica – por exemplo, na frequência, cobertura, diversidade e vitalidade dos talos – correlacionam-se diretamente com as concentrações desses poluentes. É comum observar, em áreas fortemente impactadas, o declínio das espécies sensíveis e o predomínio das tolerantes, refletindo o perfil da poluição local.

2.4.1. Metodologias de Biomonitoramento com Líquens

Dois abordagens complementares são usadas no biomonitoramento por líquens: o passivo e o ativo. No monitoramento passivo, faz-se o levantamento da comunidade líquênica nativa em diferentes pontos de estudo, coletando-se dados de riqueza, cobertura e frequência das espécies para comparar áreas mais ou menos poluídas. Já o monitoramento ativo envolve o transplante de talos coletados em locais de baixa poluição — por exemplo, retirados de florestas preservadas — para locais potencialmente contaminados. Após um período de exposição, analisa-se a concentração de poluentes acumulados nos talos transplantados.

Como Costa (2018) explica:

“O biomonitoramento da poluição atmosférica utilizando líquens como bioindicadores pode ser realizado com base em duas metodologias diferentes, conhecidas como monitoramento passivo... e o monitoramento ativo em que se promove o transplante de talos de líquens de área despoluída para área potencialmente poluída.”

Em estudos brasileiros, por exemplo, empregam-se frequentemente transplantes de *Parmotrema tinctorum* para monitorar poluição urbana e industrial, dada sua ampla distribuição e fácil identificação.

2.4.2. Vantagens e Limitações

O uso de líquens apresenta vantagens práticas sobre monitoramento instrumental tradicional. Por serem organismos fixos nos troncos e rochas, permitem avaliações integradas da qualidade do ar ao longo do tempo, detectando mesmo contaminações crônicas de baixo nível. Além disso, não exigem energia elétrica nem complexos equipamentos, o que reduz custos e amplia a área monitorada. Como observa Costa (2018), o biomonitoramento com líquens “se apresenta como sendo uma metodologia de baixo custo e que pode ser replicada com facilidade”. De fato, estudos destacam que o método é “simples, de baixo custo e de resultado rápido” (MOREIRA *et al.*, 2017), o que facilita diagnósticos precoces mesmo quando danos ainda não são visíveis. Entre as limitações, cabe notar que os líquens fornecem índices qualitativos (bioindicadores da presença de poluentes), mas não mensuram diretamente concentrações numéricas precisas. Por isso, em muitas pesquisas recomenda-se associar o monitoramento por líquens com análises instrumentais de amostras de ar ou do material vegetal.

2.5. Exemplos de Aplicação em Campo

A utilização de líquens como bioindicadores da qualidade do ar tem sido amplamente validada por diversos estudos aplicados tanto no Brasil quanto no exterior. Em Porto Alegre (RS), Martins *et al.* (2008) usaram monitoramento passivo para avaliar os arredores de uma usina termelétrica e verificaram que apenas líquens tolerantes à poluição sobreviveram nos locais mais impactados. No sul do Brasil, Koch *et al.* (2016) observaram que a diversidade e a vitalidade de líquens epífitos declinavam nitidamente em áreas urbanizadas, onde altos níveis de NO_x, MP e metais (como Cu) estavam presentes. Eles concluíram que “a poluição do ar foi um fator determinante para a diversidade de líquens. Alterações na composição da comunidade líquenica e na vitalidade foram muito significativamente relacionadas à

poluição”, o que reforça que mudanças na cobertura e saúde dos líquens refletem o somatório de estresses ambientais. Outros estudos brasileiros têm apontado espécies comuns usadas como bioindicadores, especialmente líquens folhosos do gênero *Parmotrema* e *Pseudevernia*, que acumulam metais e sinais de dano foliar.

Em Piracicaba (SP), área de intenso tráfego urbano e indústria de cana-de-açúcar, espera-se encontrar padrões semelhantes: nos pontos mais poluídos, taxações de cobertura tendem a mostrar espécies mais resistentes dominando a micota líquenica. A inclusão dos dados locais (piracicabanos) e a metodologia acima descrita permitirão interpretar como as características urbanas e agrícolas influenciam a composição líquenica. Em síntese, toda evidência aponta que os líquens são biomonitores eficazes, de baixo custo e de fácil aplicação, fornecendo respostas biológicas integradas às múltiplas fontes de poluição atmosférica.

2.6. Legislação e Políticas de Monitoramento Ambiental

O conjunto de normas e legislações brasileiras para a qualidade do ar é composto por instrumentos federais e estaduais. A Resolução CONAMA nº 491/2018 atualiza os padrões nacionais, fixando limites para material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}), gases poluentes (SO₂, NO₂, CO, ozônio) e metais pesados, além de introduzir os Padrões Intermediários (PI) e Finais (PF) para um controle gradual da qualidade atmosférica.

A Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQA), instituída em 2024, estabelece metas e estratégias de integração entre as diferentes esferas de governo, promovendo a redução de emissões. No âmbito estadual, o Decreto SP 59.113/2013 regulamenta a aplicação da Resolução CONAMA em São Paulo, definindo critérios para episódios críticos de poluição e prazos para implantação de medidas corretivas. Paralelamente, o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) mantém a Plataforma de Qualidade do Ar, que sistematiza dados de monitoramento de mais de 80 municípios paulistas, fornecendo relatórios e análises regionais. Apesar desse arcabouço robusto, a cobertura geográfica permanece desigual devido às limitações financeiras, técnicas e de coordenação institucional.

2.7. Desafios e Perspectivas

Apesar dos avanços normativos e metodológicos no monitoramento da qualidade do ar, como regulamentados pela Resolução CONAMA 491/2018, persistem desafios estruturais que comprometem sua plena eficácia, especialmente em municípios de médio porte como Piracicaba. Esse cenário é destacado em relatórios do IEMA (2024) e do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (2025), que aborda o acompanhamento da qualidade do ar. Esses documentos também indicam que a escassez de infraestrutura laboratorial, a falta de profissionais especializados e a baixa integração entre os diferentes níveis de gestão ambiental — federal, estadual e municipal — limitam a geração e o compartilhamento de dados confiáveis. A priorização orçamentária também representa um obstáculo recorrente (IEMA, 2024), uma vez que os investimentos em monitoramento frequentemente concorrem com outras demandas dos governos locais.

Nesse cenário, o biomonitoramento com líquens desponta como uma alternativa estratégica, capaz de mitigar parte dessas limitações. A literatura clássica e contemporânea converge nesse ponto: enquanto Hawksworth (1995) destacou, de forma pioneira, a eficiência dos líquens como bioindicadores atmosféricos, Costa (2018) reforça essa perspectiva ao evidenciar seu baixo custo, fácil aplicação e ampla cobertura espacial. Por se tratar de uma metodologia acessível, permite que municípios sem redes formais de monitoramento obtenham diagnósticos ambientais mais completos. A adoção desse método, no entanto, requer a superação de desafios operacionais, como a capacitação de técnicos, a padronização de protocolos e o desenvolvimento de critérios claros para interpretação dos dados biológicos, conforme discutido na revisão *Recent Trends and Future Challenges for Lichen Biomonitoring in Forests* de Frati e Brunialti (2023), que analisa diferentes métodos de biomonitoramento com líquens, destacando a falta de ferramentas interpretativas adequadas nos métodos de biodiversidade e a necessidade de métodos padronizados em análises de bioacumulação de líquens.

Além disso, é fundamental estabelecer redes colaborativas entre universidades, órgãos ambientais e sociedade civil, fortalecendo a integração dos dados provenientes do biomonitoramento com os sistemas convencionais de análise físico-química (COSTA, 2018). Essa integração não apenas amplia a confiabilidade

dos diagnósticos, como também subsidia ações mais efetivas no controle da poluição atmosférica.

No contexto específico de Piracicaba, a implementação do biomonitoramento por líquens representa uma oportunidade concreta de superar as limitações locais de infraestrutura (IEMA, 2024). Ao articular o conjunto normativo vigente e as metodologias consolidadas na literatura, como discutido por Costa (2018) e por Hawksworth (1995), é possível construir um modelo de gestão ambiental mais inclusivo, eficiente e alinhado às necessidades da cidade. Dessa forma, os líquens deixam de ser apenas bioindicadores e se tornam ferramentas estratégicas na promoção da saúde ambiental e na formulação de políticas públicas mais sustentáveis.

A eficácia das políticas de monitoramento atmosférico enfrenta desafios práticos: muitos municípios carecem de infraestrutura laboratorial e de profissionais especializados para operar sistemas convencionais ou realizar análises detalhadas (IEMA, 2024; MMA, 2025). A falta de um sistema integrado de compartilhamento de dados entre órgãos federais, estaduais e municipais dificulta a construção de mapas nacionais consistentes da qualidade do ar (IEMA, 2024; MMA, 2025; CONAMA, 2024). Além disso, a definição orçamentária para monitoramento frequentemente compete com outras demandas públicas, reduzindo a prioridade dada ao controle da poluição. Em contrapartida, o biomonitoramento com líquens apresenta-se como ferramenta complementar viável, capaz de suprir lacunas de cobertura espacial e estimular o engajamento comunitário (COSTA, 2018; HAWKSWORTH, 1995). Para ampliar sua efetividade, recomenda-se a padronização de protocolos, o treinamento de técnicos locais e a articulação de redes colaborativas entre universidades, órgãos ambientais e sociedade civil, de modo a integrar resultados biológicos a sistemas formais de monitoramento físico-químico (COSTA, 2018).

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

O estudo focou na quantificação da diversidade e da cobertura líquênica em áreas estratégicas de Piracicaba, São Paulo. As coletas aconteceram nas proximidades do Rio Piracicaba; no Centro Urbano; na Estação Experimental de Tupi — Horto Florestal; e no entorno do distrito industrial UNILESTE, que abriga 117 empresas segundo o site da Prefeitura de Piracicaba. Essas localidades corresponderam às estações onde a contagem foi realizada, integrando técnicas simplificadas de coleta e cultivo controlado baseadas em protocolos consagrados.

A retirada das amostras foi feita com lâminas de bisturi esterilizadas (imersas em álcool 70% e secas), assegurando a remoção cuidadosa dos talos sem danificar suas estruturas. As amostras foram acondicionadas individualmente em sacos de papel, devidamente identificadas com local, data e árvore de origem, prevenindo contaminação por fungos conforme procedimentos validados (AGUIAR *et al.*, 2005; VARGAS *et al.*, 2023). Para avaliação comparativa dos efeitos da poluição, subamostras foram mantidas vivas em câmaras de cultivo mínimo: placas de Petri contendo algodão esterilizado umedecido com água destilada, sob temperatura controlada (20–25 °C), por um período de dois meses, sem adição de solventes ou nutrientes complexos.

Em campo, os troncos das árvores foram divididos em quadrantes para cálculo da porcentagem de cobertura líquênica (GONÇALVES *et al.*, 2007), registrando-se a abundância por morfotipo (crostosos, foliosos ou fruticulosos). Os dados quantitativos foram analisados via índices de diversidade (LIMA *et al.*, 2016), aplicação do Índice de Pureza Atmosférica (IPA). Alterações morfológicas (cor, textura) foram documentadas para inferências qualitativas sobre poluentes (MARTINS *et al.*, 2008).

Após o período de cultivo, as amostras foram submetidas apenas a observações microscópicas simples, sem realização de análises celulares detalhadas ou testes de extração de pigmentos.

A metodologia adotada combinou rigor científico na coleta e preservação das amostras com protocolos de cultivo acessíveis, garantindo viabilidade técnica no contexto escolar. A integração entre quantificação *in situ* e observações morfológicas

permitiu correlacionar a ocorrência liquênica com os níveis de poluição atmosférica nas áreas estudadas, mantendo o foco na exequibilidade e confiabilidade dos dados.

3.1. Coleta e Cultivo de Líquens

Para iniciar a coleta de líquens, com os locais previamente definidos, foram separados os materiais: lâminas de bisturi esterilizadas, sacos de papel e caneta para identificação.

A atividade teve início na Rua do Rosário, com a coleta realizada em uma árvore localizada em frente à residência de número 25 (Figura 1). Nesse ponto, observou-se uma maior concentração de líquens do tipo crostoso. As amostras foram cuidadosamente removidas com o auxílio do bisturi, acondicionadas em sacos de papel e devidamente identificadas para posterior análise (Figura 2).

Figura 1: Líquens crostosos na Rua do Rosário



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 2: Saco de papel com líquens crostosos coletados na Rua do Rosário



Fonte: Dos autores (2025).

Na sequência, a equipe dirigiu-se às margens do rio Piracicaba, onde também foi registrada uma elevada concentração de líquens. Nesse local, foram encontrados e coletados líquens dos tipos crostoso (Figuras 3 e 4) e folioso (Figura 5), os quais foram separados em sacos de papel distintos e identificados conforme o tipo e o ponto de coleta (Figura 6).

Figura 4: Líquens crostosos à margem do rio



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 3: Diferentes líquens crostosos



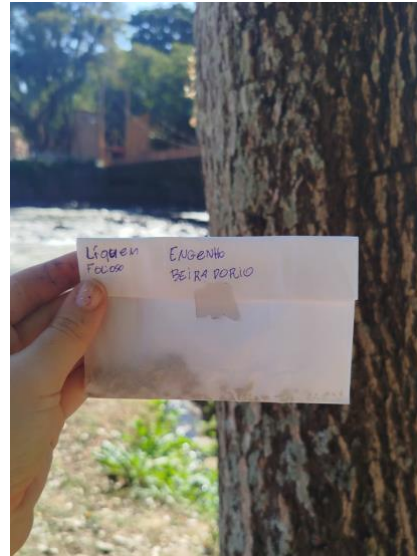
Fonte: Dos autores (2025).

Figura 5: Líquens foliosos a margem do Rio Piracicaba



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 6: Saco de papel com líquens foliosos a margem do Rio Piracicaba



Fonte: Dos autores (2025).

Em seguida, a equipe realizou a coleta no entorno da Biblioteca Municipal, local em que também foi registrada predominância de líquens crostosos (Figuras 7 e 8). As amostras foram coletadas com os mesmos cuidados e procedimentos adotados anteriormente.

Figura 7: Árvore com líquens na praça da Biblioteca Municipal



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 8: Líquens crostosos coletados na praça da Biblioteca Municipal



Fonte: Dos autores (2025).

Na sequência, a coleta foi realizada nas proximidades do distrito industrial Unileste, onde foi notada uma presença significativamente reduzida de líquens. A equipe precisou percorrer o local de carro em busca de árvores que apresentassem exemplares visíveis. Apenas uma árvore foi identificada com líquens, e mesmo assim, em pequena quantidade, cerca de 10 líquens no total, concentrados principalmente em uma área específica da árvore coletada (Figura 9). Essa escassez pode estar associada à poluição atmosférica gerada pelas atividades industriais da região e maior interferência antrópica. Uma amostra de líquen foi coletada e separada cuidadosamente (Figura 10).

Figura 10: Árvore com líquens crostosos na Unileste



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 9: Coleta de líquens crostosos na Unileste



Fonte: Dos autores (2025).

Por fim, a última coleta foi realizada no Horto Florestal, uma área de preservação ambiental (Figura 11). Diferentemente do local anterior, observou-se uma grande quantidade de líquens, com presença significativa tanto do tipo crostoso quanto folioso (Figura 12). As amostras estavam amplamente distribuídas pelas árvores, e foram coletadas separadamente, seguindo o mesmo protocolo de identificação. A elevada presença e diversidade de líquens nesse ambiente possivelmente se deve às melhores condições ecológicas, como a baixa poluição, o que favorecem o desenvolvimento e a permanência desses organismos.

Figura 12: Placa de entrada do Horto Florestal de Tupi



Fonte: Dos autores (2025).

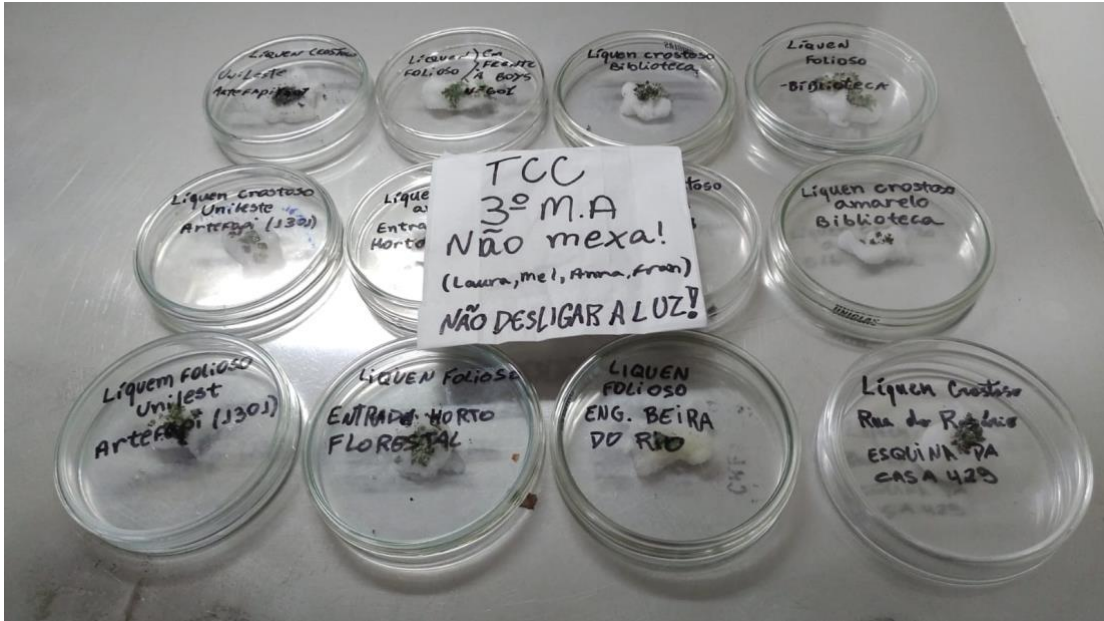
Figura 11: Árvore com líquens no Horto Florestal de Tupi



Fonte: Dos autores (2025).

No laboratório, cada amostra foi acondicionada em placas de Petri limpas e rotuladas com essas informações (Figura 13). Uma pequena quantidade de água destilada foi adicionada a cada placa, apenas o suficiente para umedecer levemente o fundo, sem provocar acúmulo excessivo de líquido. As placas foram então fechadas e mantidas em temperatura ambiente, variando entre 20 °C e 25 °C, considerada adequada para a conservação de líquens, e expostas à luz artificial constante do ambiente do laboratório.

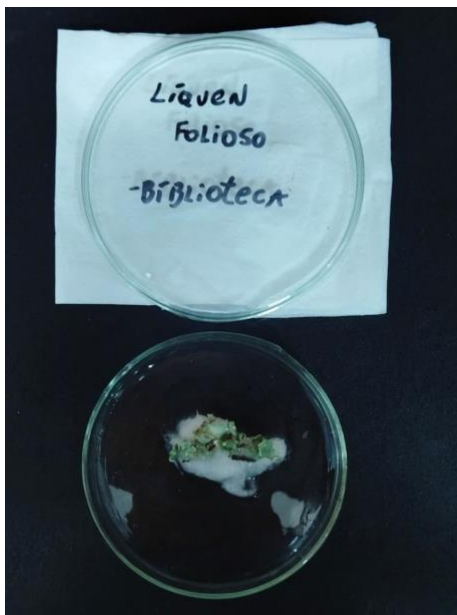
Figura 13: Placa de Petri para cultivo dos líquens coletados



Fonte: Dos autores (2025).

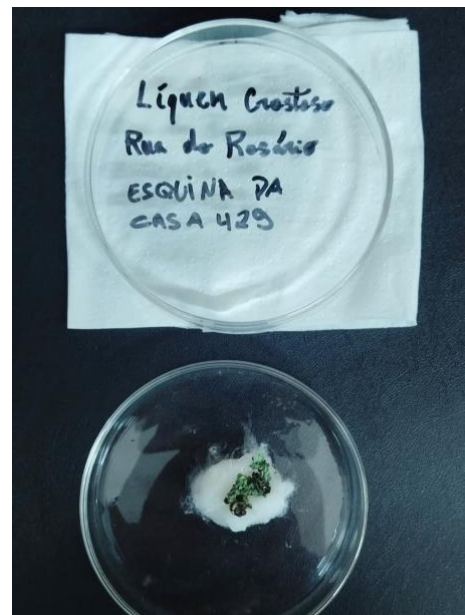
As amostras foram umedecidas com água destilada uma vez por semana, durante visitas regulares ao laboratório, com o objetivo de manter uma umidade mínima e evitar o ressecamento completo (Figuras 14 e 15).

Figura 15: Cultivo do líquen folioso da Rua do Rosário



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 14: Cultivo do líquen crostoso da praça da Biblioteca Municipal



Fonte: Dos autores (2025).

Essa frequência de rega foi suficiente para preservar as estruturas visíveis dos líquens durante o período de observação, já que esses organismos são naturalmente resistentes à variação de umidade e conseguem permanecer ativos mesmo após reidratação (Figuras 16 e 17).

Figura 17: Cultivo do líquen folioso



Fonte: Dos autores (2025).

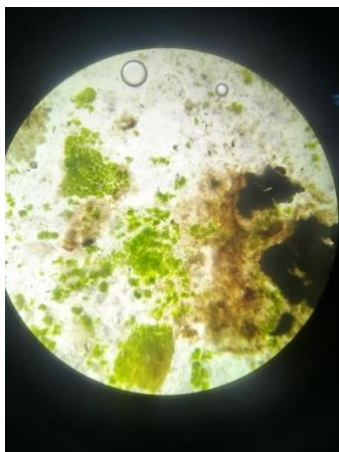
Figura 16: Cultivo do líquen folioso 2



Fonte: Dos autores (2025).

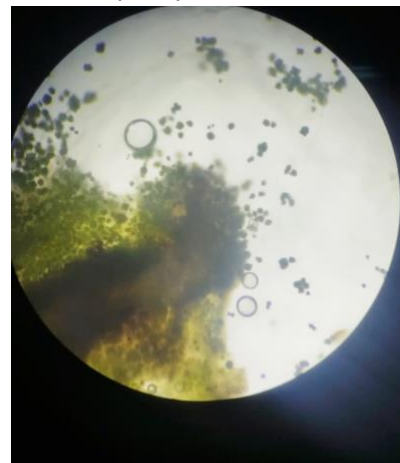
Após aproximadamente 30 dias, as amostras foram analisadas ao microscópio óptico. Para isso, fragmentos foram cuidadosamente manipulados com pinças esterilizadas e transferidos para lâminas contendo gotas de água destilada, o que facilitou a visualização das estruturas. As imagens registradas serviram como material ilustrativo para compor os resultados do trabalho (Figuras 18 e 19).

Figura 18: Líquen cultivado sob microscópio óptico



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 19: Líquen cultivado sob microscópio óptico 2



Fonte: Dos autores (2025).

3.2. Biomonitoramento em Campo

3.2.1. Caracterização do município de Piracicaba

Piracicaba é um município do interior do estado de São Paulo, localizado na Região Sudeste do Brasil, a aproximadamente 154 km da capital paulista (Figura 20). Suas coordenadas geográficas são 22°42'30"S e 47°38'01"W, com altitude média de 554 m. O território totaliza 1.378,50 km², sendo 245,44 km² de área urbana e 1.133,06 km² de área rural. A população estimada é de cerca de 438 mil habitantes. O relevo pode ser classificado como suavemente ondulado a moderadamente acidentado. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, com verões quentes e chuvosos e invernos secos. Quanto à vegetação, o município pertence ao bioma Mata Atlântica, na forma de Floresta Estacional Semidecidual, ainda presente em fragmentos protegidos, como a Estação Ecológica de Ibicatu e o Horto de Tupi. A hidrografia é marcada pelo rio Piracicaba, importante para a história e identidade da cidade, além do rio Corumbataí e outros afluentes menores.

Figura 20: Localização de Piracicaba no Estado de São Paulo



Fonte: WIKIPEDIA (2025).

A economia do município é fortemente baseada no setor agroindustrial, com destaque para a produção de cana-de-açúcar e seus derivados, bem como indústrias alimentícias, metalúrgicas e de máquinas e equipamentos agrícolas. Em 2010, aproximadamente 44% da área de Piracicaba estava ocupada por canaviais, responsáveis pela produção de mais de 4,8 milhões de toneladas de cana, o que colocava o município como o terceiro maior produtor paulista. O distrito do Unileste reúne parte expressiva das atividades industriais, reforçando esse caráter produtivo. Historicamente, a queima da palha da cana foi uma prática recorrente para facilitar o corte manual, embora já esteja restrita pela Lei Estadual nº 11.241/2002 e por protocolos posteriores. Ainda assim, os incêndios de vegetação continuam sendo um problema ambiental recorrente. Em 2024, por exemplo, a área queimada em Piracicaba aumentou 707% em relação ao ano anterior. Incêndios de grandes proporções, como o que consumiu cerca de 50 hectares na Serra do Monte Branco, chegaram a ameaçar fragmentos de conservação, como a Estação Ecológica de Ibicatu. Também ocorreram episódios em áreas urbanas, como no bairro Sol Nascente, onde queimadas em vegetação próxima a escolas municipais geraram preocupação devido à fumaça.

Somados a esses fatores, o tráfego urbano intenso e as atividades industriais contribuem para o comprometimento da qualidade do ar. Boletins da CETESB registram episódios classificados entre “moderada” e “ruim”, principalmente nos meses secos ou em períodos de colheita da cana, embora também existam dias em que a qualidade é considerada “boa”. Essas condições ambientais justificam o uso de bioindicadores sensíveis em Piracicaba, como os líquens, que permitem avaliar com mais clareza os gradientes locais de poluição atmosférica.

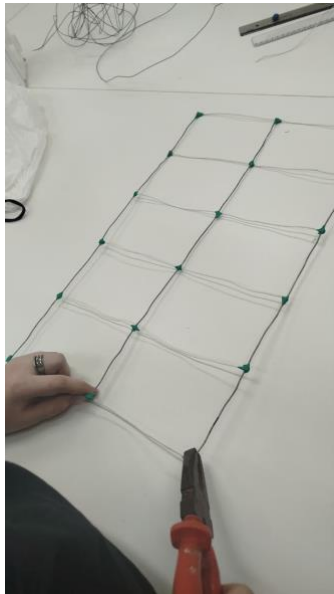
3.2.2. Contextualização

O biomonitoramento feito em campo seguiu principalmente a metodologia de Santos *et al.* (2018), que utilizaram líquens como bioindicadores de qualidade do ar no município de Itabira. No estudo feito em Itabira, foram utilizados os métodos de Ferreira (2008) e Pereira; Quintão (2013, *apud* SANTOS *et al.*, 2018), e a fórmula de Santoni e Lijteroff (2006, *apud* SANTOS *et al.*, 2018) para o cálculo do Índice de

Pureza Atmosférica (IPA). Portanto, o presente estudo se baseará nessas mesmas metodologias, com destaque para a reprodução da prática de Santos *et al.* (2018).

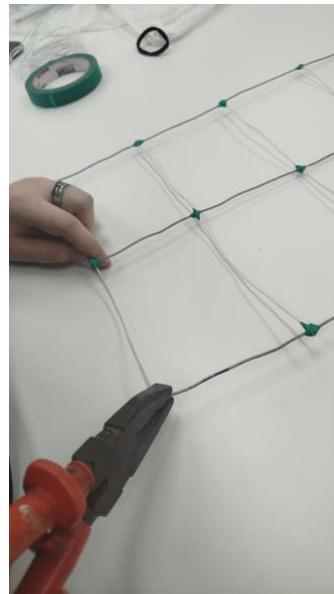
Para replicar tal método, uma “malha” ou “grade” de arame, chamada de “reticulum”, foi confeccionada, com 30 cm X 50 cm, cada quadrante medindo 15 cm X 10 cm, que seria posicionada nas árvores e usada para realizar a contagem da frequência com que os morfotipos liquênicos apareceriam nos quadrantes (Figuras 21 e 22).

Figura 21: Confeção do "reticulum"



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 22: Confeção do "reticulum"2



Fonte: Dos autores (2025).

As áreas destinadas para as análises foram as mesmas das proximidades dos 4 pontos de coleta de líquens, separando 6 árvores em cada uma. Os locais separados para o biomonitoramento da qualidade atmosférica relativa de Piracicaba foram: a praça “Cacilda de Azevedo Cavaggione” ao lado da Biblioteca Municipal, onde ; as proximidades da margem do Rio Piracicaba, com alguns pontos turísticos, seguindo a Avenida Beira Rio, que leva à conhecida Rua do Porto; o distrito industrial Unileste, dentre outros três distritos industriais na cidade, destinados à atividade de empresas variadas; e o Horto Florestal de Tupi, uma área de preservação e lazer no município, que conta com 198 hectares de mata nativa.

3.2.3. Área 1 - Praça "Cacilda de Azevedo Cavaggione" (Praça da Biblioteca Municipal)

As primeiras 6 árvores foram amostradas na praça ao lado da Biblioteca Municipal de Piracicaba, começando do sentido da Rua Saldanha Marinho até a Rua Campos Salles, no dia 19 de setembro. Segundo o site AccuWeather (2025), as condições meteorológicas na presente data apresentavam temperatura de 31°, com sensação de 33°, umidade relativa de 29%, Índice de Qualidade do Ar (IQA) identificado como ruim (71) e sem nenhuma precipitação (0 mm) (Figura 23). Vale ressaltar que, até essa data, os últimos registros de precipitação em Piracicaba foram entre os dias 26 e 27 de agosto.

Figura 23: Mapa de biomonitoramento da Área 1



Fonte: GOOGLE EARTH (2025).

A primeira árvore amostrada nessa área possuía tronco com aproximadamente 52,5 cm de diâmetro, casca relativamente rugosa e copa que proporcionava meia-sombra. A grade foi posicionada a 1,50 m do solo (Figuras 24 e 25), assim como no restante das seis árvores dessa primeira área, ao norte, lado contrário da Rua Saldanha Marinho.

Figura 25: Reticulum posicionado a 1,50m do solo



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 24: Reticulum posicionado na árvore 1



Fonte: Dos autores (2025).

A planta epífita que apareceu no primeiro quadrante foi reconhecida como pertencente ao gênero *Tillandsia*. Sua identificação é importante pois uma variedade de tais plantas apareciam em todas as áreas amostrais, alguns tipos corriam o risco de serem equivocadamente confundidos com líquens foliosos. Além das plantas e dos líquens crostosos (Figura 26), havia insetos do gênero *Andrallus* (*Andrallus spinidens*) nas proximidades (Figura 27) e identificou-se alguns líquens de coloração escura do lado oeste da árvore (provavelmente da espécie *Leptogyum cyanescens*) (Figura 28).

Figura 26: Líquens crostosos na primeira árvore da área 1



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 27: Percevejo *Andrallus spinidens*



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 28: Líquen escuro (*Leptogyum cyanescens*)



Fonte: Dos autores (2025).

O segundo indivíduo arbóreo escolhido dentro da praça da Biblioteca Municipal tinha 45,5 cm de diâmetro (Figuras 29 e 30).

Figura 30: Medida da circunferência do tronco para calcular o diâmetro da árvore 2 da área 1



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 29: Reticulum posicionado na árvore 2, área 1



Fonte: Dos autores (2025).

O terceiro indivíduo arbóreo possuía 45,8 cm de diâmetro (Figura 31).

Figura 33: Medida da circunferência da árvore 3, área 1



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 32 Reticulum posicionado na árvore 3, área1



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 31: Reticulum posicionado na terceira árvore



Fonte: Dos autores (2025).

Nas imagens da Árvore 3 (Figuras 32 e 33), fica evidente que a casca não deveria estar em boas condições de preservação, apresentando sulcos bastantes acentuados, visível na região onde a grade foi posicionada. Esse tipo de irregularidade não havia sido considerado como critério de exclusão, uma vez que ainda não se tinha analisado o quanto a textura da casca poderia influenciar na colonização líquênica na prática. Essa conclusão surgiu somente após a revisão das fotos da primeira área, mas, por isso, nas análises das áreas posteriores o critério de seleção foi ajustado.

A quarta árvore amostrada possuía 94,5 cm de diâmetro.

Figura 35: Reticulum posicionado na árvore 4



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 34: Reticulum posicionado a 1,50m do solo



Fonte: Dos autores (2025).

Como é aparente nas imagens, a quarta árvore também possuía irregularidades na casca, o que também chamou atenção na revisão fotográfica (Figuras 34 e 35).

A quinta árvore analisada (Figura 36) possuía 51,5 cm de diâmetro.

Figura 37: Reticulum posicionado na árvore 5



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 36: Líquens escuros na árvore 5



Fonte: Dos autores (2025).

A árvore 5, como é visível na imagem (Figura 37), possuía uma casca com detalhes escuros que poderiam ser confundidos com líquens crostosos do tipo *Lecidella elaeochroma* ou *Physcia stellaris*, porém não se tratavam de líquens.

O sexto e último indivíduo arbóreo analisado tinha 39,5 cm de diâmetro (Figura 38 e 39).

Figura 38: Medida da circunferência do tronco da árvore 6



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 39: Reticulum posicionado na árvore 6



Fonte: Dos autores (2025).

Em geral, os líquens observados na praça eram crostosos, raramente encontrava-se foliosos, de aparência seca e fragmentada, pelas temperaturas elevadas e baixa umidade e possivelmente por baixa qualidade do ar e carência de nutrientes. As principais fontes de poluição atmosférica próximas eram as ruas em torno da praça, com tráfego moderado de carros diariamente. Em outras possíveis observações, percebeu-se como as árvores mais externas, nos pontos periféricos da praça, mais próximas as ruas, aparentavam quase nenhum organismo liquênico, enquanto as localizadas um pouco mais para dentro tinham o que se pode chamar de uma concentração maior de líquens de apenas um lado do tronco, que era exatamente o lado oposto a rua.

3.2.4. Área 2 - Ao longo da Av. Beira Rio

A seguinte área amostral localizava-se próxima ao segundo ponto de coleta, às margens do Rio Piracicaba. As árvores dessa área foram separadas ao longo da Avenida Beira Rio, priorizando localizações perto do rio. A coleta de dados nessa extensão foi feita em 20 de setembro, quando, ainda segundo AccuWeather (2025), a temperatura em Piracicaba constava 31° (com diferença de 21-36° dependendo do local), com sensação de 34°, umidade relativa de 31%, IQA indicado como ruim (94) e ainda sem precipitação (0 mm) (Figura 40).

Figura 40: Mapa de biomonitoramento da área 2



Fonte: GOOGLE EARTH (2025).

Próximo aos indivíduos arbóreos da área 2 existem pontos de referência relevantes para a identificação de suas localizações, que são pontos turísticos importantes do município, dentre eles o Museu da Água de Piracicaba “Francisco Salgot Castillon”, a Passarela Pênsil que leva ao Engenho Central e a Casa do Povoador (Figura 41).

Figura 41: Mapa de pontos de referência da área 2



Fonte: GOOGLE EARTH (2025).

Os primeiros indivíduos arbóreos amostrados nessa área foram duas árvores perto do início da Passarela Pênsil, uma mais próxima às margens do Rio Piracicaba e outra bem ao lado do começo da passarela.

A árvore 1 possuía aproximadamente 30 cm de diâmetro, com uma copa aberta que fornecia meia-sombra, casca fissurada e levemente rugosa, mas sem sulcos profundos ou lesões que comprometessem sua utilização para a amostragem.

Figura 43: Reticulum posicionado a 45cm do solo na árvore 1



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 42: Reticulum posicionado na árvore 1



Fonte: Dos autores (2025).

O reticulum foi posicionado a 45 cm do solo (Figuras 42 e 43), uma vez que, após revisão bibliográfica rápida, observou-se que a grade poderia ser posicionada entre 35-160 cm do solo, segundo Ferreira (2008), não exclusivamente a 1,50 m. Portanto, a partir daqui o posicionamento do reticulum em relação ao solo será variado, sua posição seguirá as regiões com maior concentração de comunidade líquênica das árvores, ao invés de seguir um valor de altura rígido, a altura será fixada entre 35-160 cm do solo.

A contagem da frequência de morfotipos por quadrante na primeira árvore já contou com maior presença de líquens foliosos do que na área anterior, sendo que além da região onde a grade foi posicionada, a árvore também tinha mais alguns líquens do tipo folioso em regiões superiores, tanto que um organismo folioso maior

pôde ser encontrado. Os líquens da imagem seguinte (Figura 44) foram molhados propositalmente, no intuito de fazê-los aparentes na foto, uma vez que seu cortéx se torna “transparente” com a umidade e o fotobionte (alga ou cianobactéria) da associação simbiótica fica mais visível, assim a cor esverdeada dos organismos é “realçada” ao absorver água.

Figura 44: Líquens foliosos na árvore 1



Fonte: Dos autores (2025).

O segundo indivíduo arbóreo apresentava 1,86 m de diâmetro, com altura elevada e copa aberta (Figura 45). A grade foi posicionada a 60 cm do solo (Figura 46) e os únicos líquens contados foram crostosos.

Figura 45: Reticulum posicionado na árvore 2



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 46: Medida de 60cm do solo na árvore 2



Fonte: Dos autores (2025).

Em sequência, foram analisados outros quatro indivíduos arbóreos, conforme apresentados nas imagens a seguir (Figuras 47 a 51).

Figura 47: Reticulum posicionado na árvore 3



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 48: Líquens da árvore 3 molhados



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 51: Reticulum posicionado na árvore 4



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 50: Reticulum posicionado na árvore 5



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 49: Reticulum posicionado na árvore 6



Fonte: Dos autores (2025).

3.2.5. Área 3 – Distrito industrial Unileste

O terceiro local separado para amostragem de árvores e biomonitoramento em Piracicaba foi o distrito industrial Unileste, onde seis indivíduos arbóreos foram amostrados em 21 de setembro. Nessa data as condições meteorológicas continuavam com temperaturas de 32° (21-36°), umidade 27%, IQA identificado como insalubre (105) e sem precipitação (0 mm) (Figura 52).

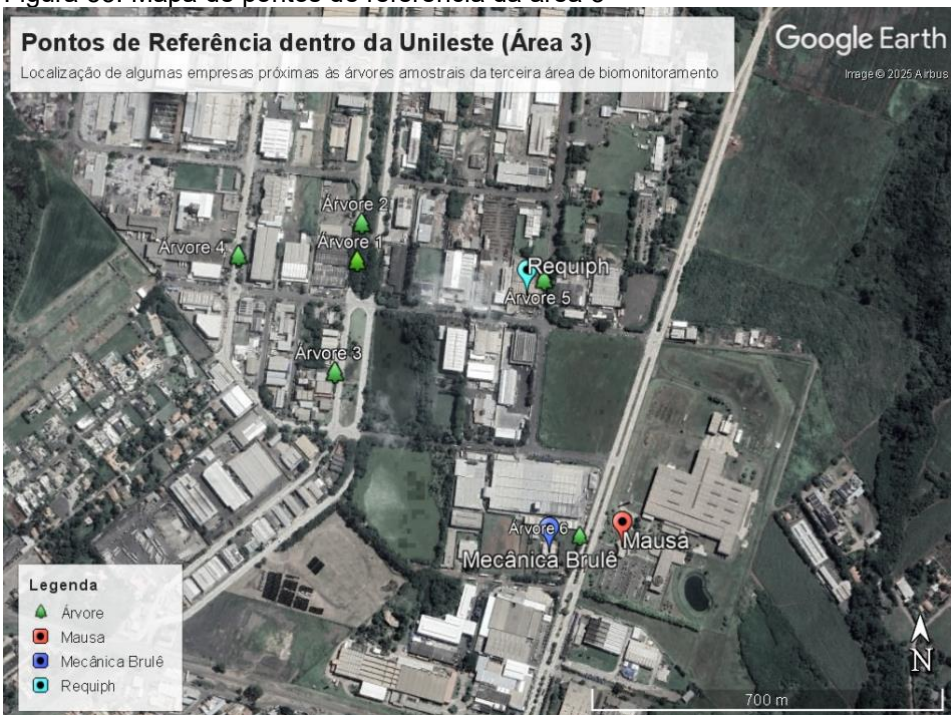
Figura 52: Mapa de biomonitoramento da área 3



Fonte: GOOGLE EARTH (2025).

Para melhor identificação do espaço, a imagem a seguir apresenta alguns pontos de referência do local da análise (Figura 53).

Figura 53: Mapa de pontos de referência da área 3



Fonte: GOOGLE EARTH (2025).

Nesta terceira área, foi possível identificar líquens crostosos na primeira árvore analisada (Figuras 54 e 55).

Figura 55: Reticulum posicionado na árvore 1



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 54: Líquens crostosos molhados na árvore 1



Fonte: Dos autores (2025).

Para a segunda análise, o reticulum foi posicionado a 110 cm do solo, conforme mostram as figuras 56 e 57.

Figura 56: Reticulum posicionado na árvore 2



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 57: Medida de 110cm do solo na árvore 2



Fonte: Dos autores (2025).

Foram analisadas outras quatro árvores, conforme indicado nas imagens a seguir (Figuras 58 a 62).

Figura 58: Reticulum posicionado na árvore 3



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 59: Reticulum posicionado na árvore 4



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 61: Reticulum posicionado na árvore 5



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 62: Líquens crostosos molhados da árvore 5



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 60: Reticulum posicionado na árvore 6

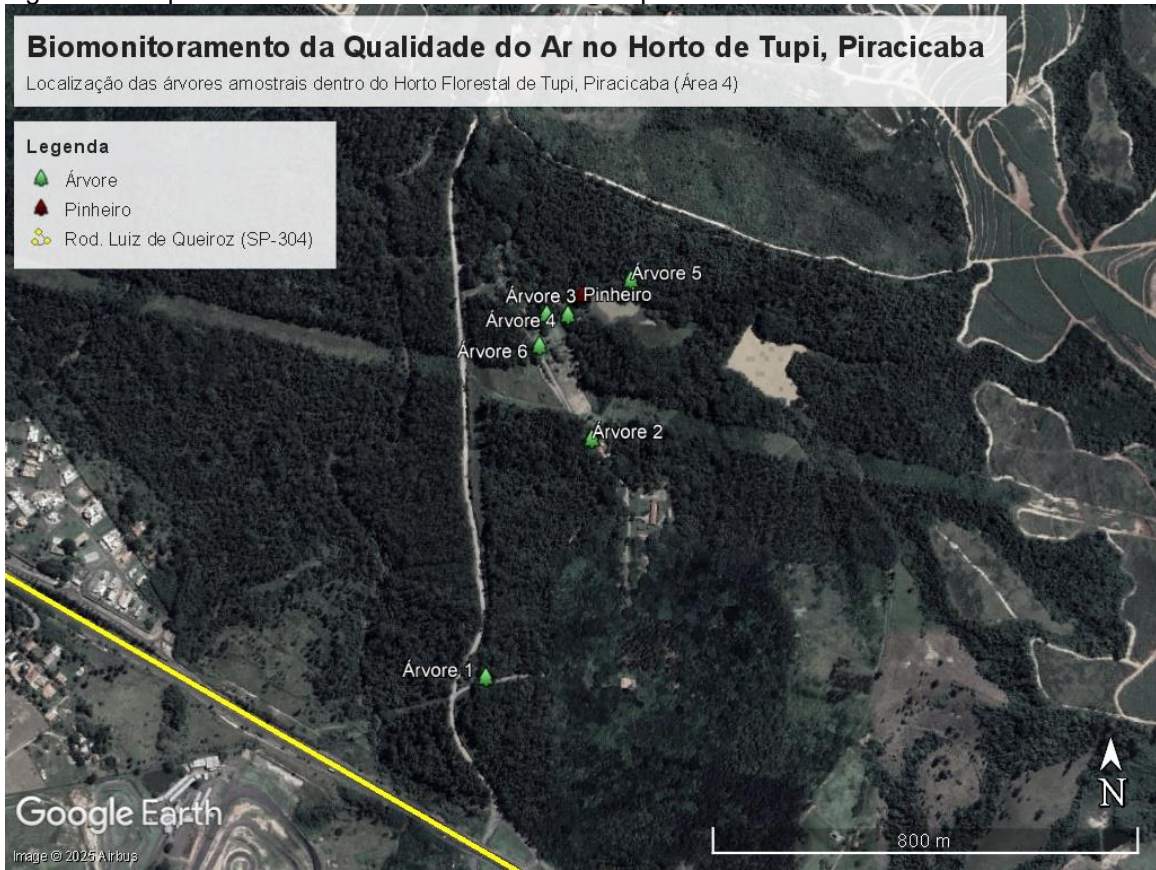


Fonte: Dos autores (2025).

3.2.6. Área 4 – Horto Florestal de Tupi

A última área de amostragem foi a estação experimental Horto Florestal de Tupi, uma área de preservação no município, que abriga grande variedade de espécies de plantas e aves (Figura 63). As análises no Horto foram feitas em dia chuvoso, 22 de setembro, quando a temperatura mudara para 23° (16-28°), a umidade subira para 77%, o IQA geral era ruim (85), mas observou-se que nos locais mais internos da estação o IQA era considerado razoável (22) e bom (18). As únicas implicações importantes do clima chuvoso foram visuais e de mobilidade, os troncos das árvores e os líquens, quando molhados, podem ser alterados visualmente, podem parecer mais aderidos ao substrato e sua extensão na grade pode parecer menor, no entanto, pela análise morfológica realizada pessoalmente levando em conta as principais diferenças e características dos morfotipos, as contagens puderam prosseguir normalmente. Portanto, as fotos das árvores amostrais dessa área são completamente ilustrativas, pois as contagens não são possíveis somente através das fotografias.

Figura 63: Mapa de biomonitoramento do Horto de Tupi



Fonte: GOOGLE EARTH (2025).

A área do Horto de Tupi pode ser acessada pela Rodovia Luiz de Queiroz e conta com várias trilhas de dificuldades diversas. Ao adentrar na estação, existem pontos de quiosque, com mesas e bancos. A mata ao redor desses quiosques é variada, mas ao lado das mesas existem árvores altas de casca grossa, fragmentada com grandes sulcos, de coloração avermelhada. Ao observar o solo próximo a essas árvores, encontram-se estróbilos (pinhas). Assim, é possível inferir, pelas características morfológicas, que pode tratar se de pinheiros do tipo *pinus elliottii*. Esses pinheiros não foram incluídos na amostragem, por conta do critério de seleção de árvores que orienta a excluir espécies com sulcos profundos, além de que suas cascas não possuíam o aspecto adequado para observar comunidades líquênicas em “cobertura”, no entanto é interessante notar a forma como os organismos simbióticos estudados se aderem e se acumulam nas “rachaduras” desse tipo de casca (Figuras 64 e 65). Isso acontece porque, além de serem uma região que acumula mais umidade, água e nutrientes, essas aberturas de aspecto áspero e irregular oferecem um tipo de substrato em que as rizinas líquênicas se aderem mais facilmente.

Figura 64: Reticulum posicionado no pinheiro



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 65: Casca do pinheiro



Fonte: Dos autores (2025).

A primeira árvore foi amostrada antes de um período breve de precipitação (Figuras 66 e 67).

Figura 67: Reticulum posicionado na árvore 1



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 66: Reticulum posicionado a 125cm do solo na árvore 1



Fonte: Dos autores (2025).

Após esse período, foi posicionado o reticulum a uma altura de 110 cm do solo a fim de realizar a amostragem da segunda árvore (Figuras 68 e 69).

Figura 68: Reticulum posicionado na árvore 2



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 69: Medida de 110cm do solo na árvore 2



Fonte: Dos autores (2025).

Já para a terceira amostragem, o instrumento foi colocado a uma altura um pouco maior do que a anterior, ficando a 125 cm do solo (Figuras 70 e 71).

Figura 70: Medida de 125cm do solo na árvore 3



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 71: Reticulum posicionado na árvore 3



Fonte: Dos autores (2025).

Assim como nas áreas anteriores, a amostragem foi realizada em mais três indivíduos arbóreos, totalizando seis árvores, conforme as figuras 72 a 79.

Figura 73: Reticulum posicionado na árvore 4



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 72: Medida de 120cm do solo na árvore 4



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 74: Reticulum posicionado na árvore 5



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 75: Medida de 149cm do solo na árvore 5



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 77: Reticulum posicionado na árvore 6



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 76: Medida de 120cm do solo na árvore 6



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 78: Líquens fruticulosos.



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 79: Líquens crostosos vermelhos



Fonte: Dos autores (2025).

O horto florestal foi a área com a maior diversidade de líquens e melhor qualidade do ar. Em observações do dia passado (21 de setembro) somadas as do dia da amostragem (22 de setembro) várias espécies de líquens puderam ser encontradas, tais como *Ramalina complanata* e *Teloschistes exilis*, que são fruticulosos e, portanto, mais sensíveis a poluição, além das espécies *Pyrenula nítida*, *Parmelia caperata* e *Physcia stellaris* que, de acordo com a escala de sensibilidade relativa de Wirth (1988, *apud* FERREIRA 2008), possuem resistência média-alta a poluição atmosférica.

3.2.7. Análise de Dados

Durante o biomonitoramento foram utilizadas árvores urbanas de diferentes espécies, sem que a identificação taxonômica de cada uma fosse realizada. Essa decisão baseou-se no fato de que, conforme apontado por Ferreira (2008), a espécie arbórea não constitui variável central neste tipo de estudo, uma vez que o foco está nos líquens epífitos como bioindicadores da qualidade do ar, enquanto o forófito funciona apenas como substrato. Assim, a prioridade foi selecionar troncos íntegros, não pintados, sem danos e acessíveis para a aplicação da grade de quadrantes.

Além disso, algumas árvores incluídas apresentaram diâmetros inferiores aos cortes geralmente recomendados em outros estudos (30–40 cm). Essa escolha ocorreu e é justificada por dois motivos principais: disponibilidade de árvores

adequadas nas áreas amostradas e maior presença de líquens observada em troncos de menor diâmetro em certos locais, em comparação com troncos mais grossos que estavam excessivamente limpos, manejados ou sem colonização visível. É importante destacar que a relação entre diâmetro e colonização líquênica não é absoluta, embora árvores muito jovens possam, em alguns casos, apresentar menor cobertura, fatores como a textura e o pH da casca, a exposição microclimática e o histórico de manejo podem favorecer maior abundância de líquens em troncos mais finos. Dessa forma, a inclusão de árvores de diferentes espécies e diâmetros reflete tanto a disponibilidade real de forófitos acessíveis quanto a variabilidade natural das condições urbanas. Portanto, dentro das condições de campo, eventuais limitações decorrentes dessa heterogeneidade foram reconhecidas como parte dos fatores que podem influenciar a colonização líquênica, mas sem comprometer a validade do monitoramento realizado.

Posto isso, com os dados de frequência por quadrante coletados, gerando valores de presença/ausência de cada morfotipo líquênico dentro dos 10 quadrantes do *reticulum* (variando de 0-10), os resultados foram agrupados em planilha Excel, assim como fizeram Santos *et al.* (2018), porém ocultando as espécies arbóreas. Disponíveis os valores, pode-se realizar o cálculo de Índice de Pureza do Ar (IPA) conforme a fórmula de Santoni e Lijteroff (2006), que é dada pela razão entre a soma das frequências (F) e o número de árvores (n) amostradas em cada área (6 árvores) (Figura 80).

Figura 80: Fórmula de IPA

$$IPA = \sum \frac{F}{n}$$

Fonte: Santos et al. (2018).

Além disso, dados os valores resultantes de cada cálculo de IPA dos locais amostrados, segue-se suas classificações relativas aos níveis de contaminação do ar e de qualidade do ar, segundo Ferreira (2008) apresenta (Figura 81).

Figura 81: Classificações de qualidade do ar

IPA	Contaminação do ar	Qualidade do ar
IPA < 1	Extremamente alta	Péssima
1 ≤ IPA < 4	Muito alta	Muito má
4 ≤ IPA < 8	Alta	Má
8 ≤ IPA < 13	Média-alta	Medíocre
13 ≤ IPA < 19	Média	Baixa
19 ≤ IPA < 26	Média-moderada	Média
26 ≤ IPA < 34	Moderada	Discreta
34 ≤ IPA < 43	Baixa	Boa
IPA ≥ 43	Muito baixa	Muito boa

Fonte: Ferreira (2008).

Assim, na tabela foram incluídos as áreas, localizações, árvores identificadas, seus respectivos números por forma de talo líquênico, o valor de IPA de cada área e suas classificações atmosféricas (Figura 82).

Figura 82: Tabela de resultados do biomonitoramento

Área	Localização	Árvores	Frequência			IPA	Contaminação do ar	Qualidade do ar
			Folioso	Crostoso	Fruticuloso			
1	Praça da Biblioteca Municipal	A1	0	10	0	8	média-alta	mediocre
		A2	0	10	0			
		A3	2	10	0			
		A4	6	5	0			
		A5	0	3	0			
		A6	0	4	0			
		Frequência Total	8	42	0			
2	Mangens do Rio (Av. Beira Rio)	A1	4	17	0	16	média	baixa
		A2	0	10	0			
		A3	0	25	0			
		A4	2	10	0			
		A5	0	16	0			
		A6	0	17	0			
		Frequência Total	6	95	0			
3	Distrito industrial Unileste	A1	0	4	0	7	alta	má
		A2	3	3	0			
		A3	0	14	0			
		A4	0	10	0			
		A5	0	5	0			
		A6	0	3	0			
		Frequência Total	3	39	0			
4	Horto Florestal de Tupi	A1	10	5	0	21	média-moderada	média
		A2	10	10	0			
		A3	9	20	0			
		A4	14	16	0			
		A5	10	5	0			
		A6	13	6	0			
		Frequência Total	66	62	0			

Fonte: Dos autores (2025).

Durante as análises em campo, observou-se que as três primeiras áreas (Centro, Parque da Rua do Porto e Distrito Industrial Unileste) foram amostradas em condições meteorológicas semelhantes, com temperaturas elevadas (31–36 °C), umidade relativa do ar baixa (15–27%) e ausência de precipitação (0 mm). Nessas condições, os líquens se apresentavam relativamente secos, o que favorece uma observação mais clara das estruturas e morfotipos.

Entretanto, a quarta área (Horto de Tupi) foi amostrada em dia chuvoso, após o adiamento da coleta originalmente prevista para 21 de setembro, logo após a amostragem do Unileste. Por compromissos e restrições de horário, não foi possível realizar a coleta nesta data, sendo então transferida para o dia seguinte, quando ocorreu precipitação. Assim, os troncos e líquens encontravam-se úmidos. As principais implicações dessa condição se restringem a leves alterações visuais, como mudança de coloração dos talos e aparência mais aderida à superfície do tronco. Ainda assim, a análise morfológica permitiu discernir com clareza os morfotipos presentes, de modo que a contagem e classificação foram realizadas normalmente.

Cabe ressaltar que, embora não tenham sido registrados líquens fruticulosos nos quadrantes analisados das árvores amostradas no Horto, observou-se a presença desse grupo em outras partes do ambiente. Em particular, exemplares do gênero *Teloschistes* foram encontrados em galhos caídos próximos à Árvore 1, provavelmente deslocados pelas chuvas, visto que no dia anterior não se verificava tal abundância desse gênero no local. Tais observações reforçam a importância de considerar não apenas os dados quantificados, mas também as condições ambientais específicas do momento da coleta, que podem influenciar a detectabilidade e a distribuição local dos líquens.

O aspecto mais marcante foi o contraste entre as áreas, com valores de IPA variando de 7 (área 3) a 21 (área 4), evidenciando maior diversidade liquênica em áreas verdes e maior impacto ambiental em zonas industriais. Esse padrão relativo é um dos principais objetivos do biomonitoramento com líquens, confirmando sua sensibilidade à poluição atmosférica. A média dos valores obtidos foi 13,0, o que, embora forneça uma estimativa exploratória para o município, deve ser interpretada com cautela devido ao número limitado de pontos amostrais. Assim, a força do estudo reside sobretudo na análise comparativa entre áreas de diferentes características ambientais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas coletas de líquens em diferentes pontos da cidade, escolhidos por apresentarem diferentes níveis de impacto ambiental e características urbanas variadas. A análise das amostras permitiu identificar variações na presença, diversidade e abundância dos líquens, que são diretamente influenciadas pela qualidade do ar e condições ambientais locais.

4.1. Observações em Campo

A coleta realizada na Rua do Rosário revelou uma concentração significativa de líquens do tipo crostoso, principalmente em árvores localizadas em áreas residenciais com menor fluxo de veículos e atividades industriais próximas. Essa predominância indica uma melhor qualidade do ar nesse local, pois líquens crostosos são conhecidos por serem mais sensíveis à poluição.

Nas margens do rio Piracicaba, observou-se uma elevada concentração tanto de líquens crostosos quanto foliosos. A presença desses dois tipos sugere um ambiente relativamente menos poluído, com níveis adequados de umidade, favorecendo a diversidade dos líquens. A proximidade de uma área natural também contribui para essa maior diversidade.

Já nas imediações da Biblioteca Municipal, a predominância de líquens crostosos reforça a ideia de que, apesar da região urbana, a qualidade do ar apresenta condições moderadas, possibilitando o desenvolvimento desses organismos.

Por fim, na área próxima ao distrito industrial Unileste, a quantidade de líquens coletados foi consideravelmente menor. A equipe encontrou apenas uma árvore com cerca de 10 líquens em uma área restrita, evidenciando uma possível influência negativa da atividade industrial e maior poluição atmosférica. Essa escassez reforça a sensibilidade dos líquens às substâncias poluentes emitidas por fontes industriais e tráfego intenso.

4.2. Comparação Morfológica com Imagens de Referência

A identificação morfológica dos líquens coletados em Piracicaba indica a presença dos gêneros *Parmotrema* e *Punctelia*. A eficácia destes gêneros como bioindicadores é comprovada por suas características morfofisiológicas específicas que permitem a acumulação de poluentes atmosféricos.

O gênero *Parmotrema* possui talos foliulares com alta relação superfície-volume e ausência de cutícula, maximizando a absorção de contaminantes. Esta capacidade foi demonstrada em estudo que utilizou *Parmotrema tinctorum* como bioindicador de poluição do ar (RAIMUNDO-COSTA *et al.*, 2021). Já o gênero *Punctelia* mostra eficiência na retenção de material particulado e elementos tóxicos. Uma pesquisa identificou espécies microfoliosas deste gênero como adequadas para monitoramento magnético da poluição urbana (CHAPARRO *et al.*, 2013).

Com base nas imagens capturadas em campo e no laboratório, foi realizada uma análise comparativa com fotografias de líquens encontradas em bancos de dados científicos. Essa análise visual considerou características como cor, formato, textura, ainda que não tenha sido realizada uma identificação taxonômica precisa por meio de testes químicos ou moleculares, a semelhança visual entre algumas amostras e as imagens consultadas permite sugerir, com cautela, possíveis espécies ou grupos de líquens semelhantes aos observados, embora não tenha sido realizada análise taxonômica detalhada.

Figura 83: Líquen folioso



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 84: Líquen folioso



Fonte: PARMOTREMA.

O líquen folioso coletado próximo à margem do rio apresentou talos com lobos largos e relativamente arredondados, características comuns no gênero *Parmotrema*. Ao comparar as imagens registradas (Figura 83) com fotos da espécie *Parmotrema perlatum* encontradas em bancos de imagens disponíveis online (Figura 84), notou-se semelhanças na forma e estrutura visual, o que sugere que a amostra pode pertencer a esse gênero ou a espécies próximas. No entanto, não foram realizados testes taxonômicos para confirmação definitiva dessa identificação, de modo que esta deve ser considerada uma associação preliminar.

Figura 85: Líquen microfolioso sendo coletado



Fonte: Dos autores (2025).

Figura 86: Líquen microfolioso



Fonte: PUNCTELIA.

O líquen microfolioso coletado nas proximidades do distrito Unileste (Figura 85) apresentou coloração cinza-azulada e aspecto aderido ao tronco, características compatíveis com líquens do gênero *Punctelia*. Ao comparar as imagens registradas com fotografias disponíveis em bancos de imagens online (Figura 86), como a da espécie *Punctelia graminicola*, observamos semelhanças visuais na coloração e na estrutura geral. No entanto, por se tratar apenas de uma análise morfológica visual, essa associação é preliminar e não constitui uma identificação taxonômica definitiva.

4.3. Interpretação dos Resultados

Os resultados obtidos indicam uma clara relação entre a presença e diversidade de líquens e as condições ambientais locais, principalmente no que se refere à qualidade do ar. A maior concentração de líquens nas áreas com menor

impacto urbano-industrial sugere que esses organismos são sensíveis às substâncias poluentes presentes no ar, como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e metais pesados.

A redução significativa da quantidade de líquens próxima à fábrica Unileste reforça essa hipótese, evidenciando que as emissões industriais influenciam negativamente a sobrevivência desses bioindicadores. A presença de líquens crostosos e foliosos em áreas mais preservadas está alinhada com a literatura que aponta esses organismos como indicadores eficazes de qualidade do ar.

Além disso, a manutenção das amostras em laboratório mostrou que os líquens possuem resistência natural a variações de umidade, podendo sobreviver em condições adversas, o que os torna ainda mais adequados para monitoramento ambiental.

Essas observações corroboram o uso dos líquens como bioindicadores, demonstrando a importância de sua conservação e do monitoramento contínuo para avaliação da poluição atmosférica em ambientes urbanos.

5. CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu comprovar a eficácia dos líquens como bioindicadores da qualidade do ar no município de Piracicaba. As análises em campo evidenciaram variações significativas na presença, diversidade e abundância desses organismos em diferentes pontos da cidade, demonstrando de forma prática a influência da poluição atmosférica sobre sua ocorrência. A baixa quantidade de líquens em áreas industriais contrastou com a elevada diversidade observada em regiões de preservação, confirmando que esses organismos respondem de maneira direta aos impactos ambientais locais.

O estudo reforça que o biomonitoramento por líquens é uma ferramenta viável, de baixo custo e aplicável em municípios que não dispõem de infraestrutura robusta para análises físico-químicas contínuas. Embora não substitua os métodos instrumentais, sua utilização complementar amplia a cobertura espacial do monitoramento e fornece informações relevantes para diagnósticos ambientais e para a formulação de políticas públicas voltadas ao controle da poluição.

Além disso, a pesquisa contribui para a conscientização sobre os efeitos da poluição atmosférica, evidenciando a necessidade de integrar métodos acessíveis ao planejamento urbano e industrial. A adoção desse tipo de monitoramento pode auxiliar gestores públicos, instituições de ensino e a sociedade civil na construção de práticas mais sustentáveis, fortalecendo a prevenção de impactos à saúde humana e à biodiversidade.

Portanto, este trabalho não apenas confirma a relevância dos líquens como bioindicadores, mas também demonstra sua aplicabilidade em contextos locais, oferecendo subsídios para estratégias ambientais mais eficazes e democratizando o acesso a ferramentas de monitoramento. Os resultados obtidos evidenciam que a utilização de metodologias científicas acessíveis é fundamental para reduzir lacunas de informação e promover avanços concretos no enfrentamento da poluição atmosférica.

REFERÊNCIAS

ACCUWEATHER. **Índice de qualidade do ar em Piracicaba**. AccuWeather, 2025. Disponível em: <https://www.accuweather.com/pt/br/piracicaba/36376/air-quality-index/36376>. Acesso em: 21 maio 2025.

AGNAN, Yannick; ONDOVCHIK, Elizaveta; SÉGUIA, Sylvie. **A systematic review on biomonitoring using lichen as the biological indicator: a decade of practices, progress and challenges**. *Ecological Indicators*, [S. l.], v. 121, p. 107197, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X20311365>. Acesso em: 12 jun. 2025.

AGUIAR, R. L.; ALVES, R. E.; SAIKI, M. **Procedimento para preparação de amostras de líquens para análise por ativação com nêutrons**. *ResearchGate*, [s. l.], 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mitiko-Saiki/publication/228468076_PROCEDIMENTO_PARA_PREPARACAO_DE_AMOSTRAS_DE_LIQUENS_PARA_ANALISE_POR_ATIVACAO_COM_NEUTRONS/links/09e41509b9a883f6cd000000/PROCEDIMENTO-PARA-PREPARACAO-DE-AMOSTRAS-DE-LIQUENS-PARA-ANALISE-POR-ATIVACAO-COM-NEUTRONS.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

AQUINO, S. M. F.; ALMEIDA, J. R.; CUNHA, R. R. R. S. B.; LINS, G. A. **Bioindicadores vegetais: uma alternativa para monitorar a poluição atmosférica**. *Revista Internacional de Ciências*, [S. l.], 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.12957/ric.2011.3629>. Acesso em: 28 mar. 2025.

ASSENCIO, Claudia; BITENCOURT, Rafael. **Piracicaba tem 21 mil hectares de cultivo e vegetação queimados em três semanas; origem criminosa, afirma Defesa Civil**. Piracicaba, 13 set. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2024/09/13/piracicaba-tem-21-mil-hectares-de-cultivo-e-vegetacao-queimados-em-tres-semanas-origem-criminosa-afirma-defesa-civil.ghtml>. Acesso em: 21 set. 2025.

BITENCOURT, Rafael. **Alta exponencial de queimadas na região preocupa especialistas, acabando com o que resta de vegetação nativa**. Piracicaba, 17 set. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2024/09/17/alta-exponencial-de-queimadas-na-regiao-preocupa-especialistas-acabando-com-o-que-resta-de-vegetacao-nativa.ghtml>. Acesso em: 21 set. 2025.

BIZIAK, Lucas Dovigo; BALLESTER, Maria Victoria Ramos. **Queima de cana-de-açúcar no município de Piracicaba-SP e seus impactos legais e ambientais**. Universidade de São Paulo - USP/CENA, Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, abr. 2013. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.49.27/doc/p0640.pdf?languagebutton=en>. Acesso em: 21 de set. de 2025.

BOONPRAGOB, Kansri; NASH, Thomas H. III. **Seasonal variation of elemental status in the lichen *Ramalina menziesii* Tayl.** *Environmental and Experimental Botany*, Oxford, v. 30, n. 4, p. 415-428, out. 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(90\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0098-8472(90)90020-5). Acesso em: 20 mar. 2025.

BRAGA, Alfésio; PEREIRA, Luiz Alberto Amador; SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento. **Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana.** São Paulo: *ComCiência*, [s. d.]. Disponível em: https://www.comciencia.br/dossies-1-72/reportagens/cidades/paper_saldiva.pdf. Acesso em: 23 abr. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018.** Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=369516>. Acesso em: 03 set. 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.850, de 2 maio 2024.** Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar e dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão da qualidade do ar no território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 maio 2024a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14850.htm. Acesso em: 15 jun. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024.** Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2024b. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=827&option=com_sisconama&task=arquivo.download. Acesso em: 03 set. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Relatório anual de acompanhamento da qualidade do ar: 2024.** Brasília, DF: MMA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/qualidade-ambiental-e-meio-ambiente-urbano/relatorio-anual-de-acompanhamento-da-qualidade-do-ar-2024.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2025.

BRODO, Irwin M. *et al.* **Lichen bioindication of biodiversity, air quality, and climate.** Portland: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2007. (General Technical Report PNW-GTR-737). Disponível em: https://www.fs.usda.gov/pnw/pubs/pnw_gtr737.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.

CARNEIRO, F. **Importância da diversidade de líquens na avaliação da poluição atmosférica,** 2004. *Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo*, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/22/22133/tde-19102004170613/publico/mestrado.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **A inversão térmica e seu impacto na qualidade do ar.** São Paulo: CETESB, 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2023/11/07/a-inversao-termica-e-seu-impacto-na-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 17 set. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Padrões da Qualidade do Ar**. [2025]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 17 ago. 2025.

CETESB. **Qualidade do Ar - Boletim Diário**. 2025. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/boletim-diario/>. Acesso em: 21 de set. de 2025.

CHAPARRO, M. A. E.; LAVORNIA, J. M.; CHAPARRO, M. A. E.; SINITO, A. M. **Biomonitoring of urban air pollution: Magnetic studies and SEM observations of corticolous foliose and microfoliose lichens and their suitability for magnetic monitoring**. *Environmental Pollution*, v. 172, p. 61-69, 2013.

Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/230863305_Biomonitoring_of_urban_air_pollution_Magnetic_studies_and_SEM_observations_of_corticolous_foliose_and_microfoliose_lichens_and_their_suitability_for_magnetic_monitoring. Acesso em: 26 nov. 2025.

CONTI, Maria Elena; CECCHETTI, Giuseppe. **Monitoring lichens as indicators of pollution**. *Environmental Pollution*, [S. l.], v. 114, n. 3, p. 471–492, 2001. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/260174930_Monitoring_Lichens_as_Indicators_of_Pollution. Acesso em: 12 jun. 2025.

COSTA, Anne Danielle Mendes Martins da *et al.* **Indicadores de qualidade do ar mediante o uso dos líquens na área urbana do município minerador de Itabira/MG Brasil**. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 9, n. 12, p. 1-32, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i12.11310>. Acesso em: 28 mar. 2025.

COSTA, Sabrina Oliveira da. **Utilização de líquens no monitoramento ativo e passivo da poluição atmosférica**, 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – *Universidade Federal do Triângulo Mineiro*, Uberaba, 2018. Disponível em: <http://bdtd.ufm.edu.br/handle/tede/637>. Acesso em: 12 jun. 2025.

CULTIVO de líquens. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:2bGMR5NEvRUJ:scholar.google.com/+cultivo+de+liquens&hl=pt-BR&as_sdt=0,5. Acesso em: 10 maio 2025.

DEL SANTO, Edijan. **Queimada atinge vegetação próxima a escolas municipais de Piracicaba e pais buscam alunos**. Piracicaba, 17 set. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2025/09/17/queimada-atinge-vegetacao-proxima-a-escolas-municipais-de-piracicaba-e-pais-buscam-alunos.ghtml>. Acesso em: 21 set. 2025.

DESTRUIÇÃO de florestas pode impulsionar crise hídrica, alerta projeto ambiental de Piracicaba. Piracicaba, 17 out. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2021/10/17/destruicao-de-florestas-pode-impulsionar-crise-hidrica-alerta-projeto-ambiental-de-piracicaba.ghtml>. Acesso em: 21 set. 2025.

DUCHIADE, Milena P. **Poluição do ar e doenças respiratórias: uma revisão.** *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 3, p. 1-20, jul./set. 1992. Disponível em: https://www.scielo.org/article/ssm/content/raw/?resource_ssm_path=/media/asset/s/csp/v8n3/v8n3a10.pdf. Acesso em: 7 maio 2025.

ECONODATA. 220 **Empresas no bairro Unileste em Piracicaba, SP.** 2025. Disponível em: <https://www.econodata.com.br/empresas/sp-piracicaba/bairro-unileste>. Acesso em: 21 de set. de 2025.

EMERIQUE, Lucas Possedente. **Dos engenhos de açúcar à indústria automobilística: o desenvolvimento e as transformações da indústria no município de Piracicaba – SP.** 2014. Tese (Doutorado em Geografia Humana) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.8.2015.tde-12062015-113424>. Acesso em: 18 ago. 2025.

FERREIRA, Elsa Jofre Pereira Dias. **Biomonitorização da qualidade do ar: Caso-estudo na envolvente da fábrica de celulose do Caima.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia. *Universidade Nova de Lisboa*. 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/1909>. Acesso em: 09 set. 2025.

FRATI, Luisa; BRUNIALTI, Giorgio. **Recent Trends and Future Challenges for Lichen Biomonitoring in Forests.** *Forests, Basel*, v. 14, n. 3, p. 647, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f14030647>. Acesso em: 27 nov. 2025.

FUGA, Alessandra. **Uso de líquens epifíticos no biomonitoramento da poluição atmosférica da região metropolitana de São Paulo.** 2006, 126 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações) - *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*, São Paulo. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.85.2006.tde-15052012-133838>. Acesso em: 21 nov. 2025.

GAIOTO, Danielle. **Circulação de carros em Piracicaba cresce 66% e impacta mobilidade urbana.** *Mobilize Brasil*, 12 nov. 2014. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/noticias/7292/circulacao-de-carros-em-piracicaba-cresce-66-e-impacta-mobilidade-urbana.html>. Acesso em: 15 jun. 2025.

GONÇALVES, D. A. *et al.* **Métodos de avaliação de cobertura liquênica.** *Acta Botanica Brasílica*, [s. l.], 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abb/a/yhmls4ZVXqm9JRvQtx8wgS/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

GONÇALVES, V. F. *et al.* **Utilização de líquens como bioindicadores da qualidade atmosférica na cidade de Uberlândia, MG.** *Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil*, Caxambu: SEB, 2007. Disponível em: <http://www.sebecologia.org.br/revistas/indexar/anais/viiiiceb/pdf/1185.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2025.

GOOGLE MAPS. **Qualidade do ar.** [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.google.com/maps/@4.4447904,10.3268165,3z/data=!5m1!1e9?entry=tt>

u&g_ep=EgoyMDI1MDkxNi4wLWlKXMDSoASAFQAw%3D%3D. Acesso em: 17 ago. 2025.

HAMMOND, Camille Elise. **Relatório Mundial de Qualidade do Ar da IQAir de 2023: Um apelo para ampliar o monitoramento global da qualidade do ar**. Davis, CA: *ASIC Conferência Internacional de Sensores de Ar*, 2024. Disponível em: <https://asicaqrc.ucdavis.edu/news/2023-iqair-world-air-quality-report-call-broaden-global-air-quality-monitoring>. Acesso em: 17 ago. 2025.

HONDA, Neli Kika; VILEGAS, Wagner. **A química dos líquens**. *Química Nova*, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 110-125, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40421999000100018>. Acesso em: 21 nov. 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil**. São Paulo: IEMA, 2014. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/PDF>. Acesso em: 14 jun. 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Dimensionamento da Rede Básica de Monitoramento da Qualidade do Ar no Brasil: Cenários Iniciais**. São Paulo: IEMA, 2024. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2024/02/202402_dimensionamentoqarIEMA.pdf. Acesso em: 16 jul. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISAS E PLANEJAMENTO DE PIRACICABA (IPPLAP). **Localização, Relevo e Extensão Territorial de Piracicaba**. 2019. Disponível em: <https://piracicaba.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/11/Localizacao-Relevo-Extensao-Territorial.pdf>. Acesso em: 21 de set. de 2025.

KOCH, Natália Mossmann. **Efeitos da poluição atmosférica como fator de estresse ambiental na estrutura e na funcionalidade das comunidades de líquens**. 2016. 263 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10183/143740>. Acesso em: 18 set. 2025.

LIMA, Mauro Sergio Cruz Souza; SOUZA, Carlos Albertos dos Santos; PEDERASSI, Jonas. **Qual índice de diversidade usar?** *Cadernos UniFOA*, Volta Redonda, n. 30, p. 129-138, abr. 2016.

MARTINS, Suzana M. A.; KÄFFER, Márcia I.; LEMOS, Alessandra. **Líquens como bioindicadores da qualidade do ar numa área de termoeletrônica, Rio Grande do Sul, Brasil**. *Hoehnea*, [s. l.], v. 35, n. 3, p. 1-12, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hoehnea/a/FBZL4Qh8fKjBmgL6DwsnLsJ/?lang=pt>. Acesso em: 29 mar. 2025.

MOREIRA, Fernanda Deister *et al.* **Uso de líquens como bioindicadores da qualidade do ar em centro urbano, Juiz de Fora/MG**. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO AMBIENTAL E BIODIVERSIDADE, 6., 2017, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2017. p. 198–202. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325732823_USO_DE_LIQUENS_COMO_BIOINDICADORES_DA_QUALIDADE_DO_AR_EM_CENTRO_URBANO_JUIZ_DE_FORA_MG. Acesso em: 18 set. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. **Novas diretrizes da OMS sobre qualidade do ar reduzem valores seguros para poluição.** Notícias, Brasília, 23 set. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/145721-novas-diretrizes-da-oms-sobre-qualidade-do-ar-reduzem-valores-seguros-para-poluicao>. Acesso em: 14 jun. 2025.

NASH, T. H. III (ed.). **Lichen biology.** Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 1-254. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/lichen-biology/87CA882464AED46E121E8C79A99B4993>. Acesso em: 28 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Ambient (outdoor) air pollution.** Geneva: World Health Organization, 2024. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Acesso em: 14 jun. 2025.

PARMOTREMA perlatum. Wikipedia. Disponível em: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Parmotrema_perlatum. Acesso em: 28 ago. 2025.

PEREIRA, Rodrigo; DEL SANTO, Edijan. **Área queimada em Piracicaba em 2024 aumenta 707% em relação a ano anterior, diz MapBiomias.** Piracicaba, 16 set. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/piracicabaregiao/noticia/2024/09/16/area-queimada-em-piracicaba-em-2024-aumenta-707percent-em-relacao-a-ano-anterior-diz-mapbiomias.ghtml>. Acesso em: 21 set. 2025.

PINTO, A. *et al.* **Biomonitoramento da qualidade do ar: potencialidades e limitações do uso de líquens,** UFRGS LUME Depósito Digital, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/30187>. Acesso em: 28 mar. 2025.

PIRACICABA (SP). **Lei Complementar nº 251, de 12 de abril de 2010.** Dispõe sobre a consolidação da legislação que disciplina a proteção ao meio ambiente, os programas e as iniciativas na área de interesse ambiental do Município de Piracicaba. *Diário Oficial do Município de Piracicaba*, Piracicaba, ano XLIII, ed. 10284, v. 1, p. 1, 28 abr. 2010. Disponível em: <https://siave.camarapiracicaba.sp.gov.br/ProjetosLeiComplementar/2-2010>. Acesso em: 18 ago. 2010.

PIRACICABA (Município). **Serviços Distritos Industriais.** Piracicaba, SP. Disponível em: <https://piracicaba.sp.gov.br/servicos/distritos-industriais/#lightbox>. Acesso em: 03 set. 2025.

PUNCTELIA graminicola. Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em: https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Punctelia_graminicola. Acesso em: 28 ago. 2025.

RAIMUNDO-COSTA, W.; FERREIRA, D.; BORELLA MARFIL ANHÊ, A. C.; SANTOS SENHUK, A. P. M. **The use of Parmotrema tinctorum (Parmeliaceae) as a bioindicator of air pollution.** *Rodriguésia*, Rio de Janeiro, v. 72, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rod/a/sk38HhDGTX3WK3CZWsmTD4d/>. Acesso em: 26 nov. 2025.

RENTSCHLER, Jun; LEONOVA, Nadezda. **Global air pollution exposure and poverty**. *Nature Communications*, v. 14, n. 4432, jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39797-4>. Acesso em: 17 ago. 2025.

RODRIGUES, Ricardo Ribeiro. **A vegetação de Piracicaba e municípios do entorno**. INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS, n. 189, ago. 1999. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr189.pdf>, Acesso em: 21 de set. de 2025.

SANTOS, Rosiane Kátia dos; GOMES, Neliam Cristina; OLIVEIRA, Gisely de Assis; SILVA, Josiano Josiel Rodrigues; ALVARENGA, Cibele Andrade de; BELARDI, Rose-Marie. **Líquens utilizados como bioindicadores da qualidade do ar do município minerador de Itabira**. *Research, Society and Development*, Itabira, MG. v. 7, n. 12, p. 1-18, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v7i12.480>. Acesso em: 27 ago. 2025.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 59.113, de 23 abr. 2013**. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>. Acesso em: 15 jun. 2025.

SMITH, Keith E.; LAURIERE, Camille Fournier de; HENNINGER, Ella. **Persistent inequalities in global air quality monitoring should not delay pollution mitigation**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 12, n. 18, abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2423259122>. Acesso em: 17 ago. 2025.

TAGIRDZHANOVA, Gulnara *et al.* **Complexity of the lichen symbiosis revealed by metagenome and transcriptome analysis of *Xanthoria parietina***. *Current Biology*, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 799-815, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.12.041>. Acesso em: 21 nov. 2025.

TERCI, Eliana T. **Industrialização e seus impactos na urbanização do interior paulista**: uma análise comparada de Americana, Piracicaba e Santa Bárbara d'Oeste. *História Econômica & História de Empresas*, v. 12, n. 1, p. 33-69, jul. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.29182/hehe.v12i1.11>. Acesso em: 18 ago. 2025.

TORRES, Leandro Marques *et al.* **Poluição atmosférica em cidades brasileiras: uma breve revisão dos impactos na saúde pública e meio ambiente**. *Sapientiae*, [S. l.], v. 2, n. 1, 2020. Disponível em: <https://www.sapientiae.com.br/index.php/naturae/article/view/CBPC26746441.2020.001.0003/54>. Acesso em: 29 mar. 2025.

VARGAS, Luana Búrigo *et al.* **Uso de líquens como bioindicadores no monitoramento ambiental: uma revisão**. *Revista Latino-Americana de Sustentabilidade*, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 312-314, 2023. Disponível em: <https://rlas.uniplaclages.edu.br/index.php/rlas/article/view/96>. Acesso em: 30 mar. 2025.

VASQUES, Thiago Vieira. **Brazilian vehicular emission inventory software – BRAVES**. Florianópolis, 2021. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/229823>. Acesso em: 17 set. 2025.

VITIKAINEN, Orvo. **William Nylander (1822–1899) and Lichen Chemotaxonomy**. *The Bryologist*, [s. l.], v. 104, n. 2, p. 263-267, 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/232662428>. Acesso em: 20 nov. 2025. DOI: [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2001\)104\[0263:WNALC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2001)104[0263:WNALC]2.0.CO;2).

WEATHER SPARK. **Condições meteorológicas e temperatura média de Piracicaba em maio (São Paulo, Brasil)**. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/m/30183/5/Condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-caracter%C3%ADsticas-de-Piracicaba-S%C3%A3o-Paulo-Brasil-em-maio>. Acesso em: 12 jun. 2025.

WINK, Julia Gabriela *et al.* **Atuação dos líquens como bioindicadores**. *Anais do SEMEX*, UEMS, 2018. Disponível em: <http://anaisonline.uems.br/index.php/semex/article/view/5495>. Acesso em: 28 mar. 2025.

WORLD AIR QUALITY INDEX. **Poluição do ar em World: Mapa da qualidade do ar em tempo real**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://aqicn.org/map/world/pt/>. Acesso em: 17 ago. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>. Acesso em: 19 out. 2025.

Anna Julia Araújo Boscariol
Francisco Alves de Farias Neto
Laura Crispim Coelho Barbosa
Melissa Mariano

**LÍQUENS COMO BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO AR NO
MUNICÍPIO DE PIRACICABA (SP)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico em Meio Ambiente da Etec Cel. Fernando Febeliano da Costa, orientado pelos Professores Bianca Furlan Danelon e Rafael de Souza como requisito parcial para obtenção do título de técnico em Meio Ambiente.

Data de aprovação: ___/___/___

FOLHA DE APROVAÇÃO BANCA EXAMINADORA

Bianca Furlan Danelon
Professora Orientadora

Rafael de Souza
Professor Orientador

Marisa Natalina Fulan Segá
Professora de Língua Portuguesa