

INSTITUTO FEDERAL GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROQUÍMICA

POTENCIAL DE BIOINDICAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR  
POR PLANTAS PRESENTES EM UM FRAGMENTO DE  
CERRADO

Discente: Daiany de Almeida Araújo  
Orientadora: Dra. Fernanda dos Santos Farnese

RIO VERDE – GO  
fevereiro – 2023.

INSTITUTO FEDERAL GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROQUÍMICA

POTENCIAL DE BIOINDICAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR  
POR PLANTAS PRESENTES EM UM FRAGMENTO DE  
CERRADO

Discente: Daiany de Almeida Araújo

Orientadora: Dra. Fernanda dos Santos Farnese

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM AGROQUÍMICA, no Programa de Pós-Graduação em Agroquímica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Fisiologia Vegetal.

RIO VERDE – GO  
fevereiro – 2023.

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

AAR663 ALMEIDA ARAUJO, DAIANY  
p POTENCIAL DE BIOINDICAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR POR  
PLANTAS PRESENTES EM UM FRAGMENTO DE CERRADO /  
DAIANY ALMEIDA ARAUJO; orientadora Fernanda dos  
Santos Farnese; co-orientadora Paulo Eduardo de  
Menezes . -- Rio Verde, 2023.  
35 p.

Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação  
em Agroquímica) -- Instituto Federal Goiano, Campus  
Rio Verde, 2023.

1. Biomonitoramento. 2. tráfego de veículos. 3.  
fragmentação. 4. conservação. 5. biodiversidade. I.  
dos Santos Farnese, Fernanda, orient. II. de  
Menezes , Paulo Eduardo, co-orient. III. Título.

# TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

## PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998. AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado)                  | <input type="checkbox"/> Artigo científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização)       | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação)                   | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Daiany de Almeida Araujo

Matrícula:

20202033103I0016

Título do trabalho:

POTENCIAL DE BIOINDICAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR POR PLANTAS PRESENTES EM UM FRAGMENTO DE CERRADO

### RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 05 /05 /2023

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde - GO  
Local

27 /04 /2023  
Data

Daiany de Almeida Araujo

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Leonardo S. Gomes

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 47/2023 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

## PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

### ATA Nº/94

## BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos vinte e sete dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três, às 09h00min (nove horas), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada por videoconferência, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, de autoria de DAIANY DE ALMEIDA ARAUJO, discente do Programa de Pós-Graduação em Agroquímica do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pela presidente da Banca Examinadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fernanda dos Santos Farnese, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida à autora para, em 30 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu a examinada, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, e procedidas às correções recomendadas, a Dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de MESTRE (a) NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROQUÍMICA, na área de concentração em Agroquímica, pelo Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGAq da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade se não cumprida essa condição, em até 60 (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa dissertação em periódicos após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da Banca Examinadora.

#### Membros da Banca Examinadora

Nome	Instituição	Situação no Programa
Fernanda dos Santos Farnese	IF Goiano - Campus Rio Verde	Presidente
Althieris de Souza Saraiva	IF Goiano - Campus Campos Belos	Membro interno
Fabia Barbosa da Silva	IF Goiano - Campus Rio Verde	Membro externo

Lucas Loram Lourenço	IF Goiano - Campus Rio Verde	Membro externo
----------------------	------------------------------	----------------

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fabia Barbosa da Silva, 2020202341360019 - Discente**, em 27/04/2023 15:04:23.
- **Lucas Loram Lourenço, Lucas Loram Lourenço - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano (1)**, em 27/04/2023 10:49:51.
- **Althieris de Souza Saraiva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 27/04/2023 10:44:09.
- **Fernanda dos Santos Farnese, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 27/04/2023 10:41:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/02/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 469604  
Código de Autenticação: 07f1bcf092



INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
Campus Rio Verde  
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970  
(64) 3624-1000

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por todas as bênçãos e por todas graças recebidas até aqui.

A minha mãe Lourdes (*In memoriam*) e ao meu pai Graciliano pelos ensinamentos e princípios sem eles eu não conseguiria chegar a lugar nenhum. As minhas irmãs, que mesmo longe estão sempre presentes, Geisiane e Tatiane obrigada!

Ao meu esposo e papai da minha Cecília “Jaderson”, que me acompanhou incentivou a continuar durante todo esse tempo de mestrado. Obrigada por me presentear com o maior tesouro que a vida pode nos dar que é um filho. Te amo.

Aos meus colegas de laboratório LEAF que sem sobra de dúvidas sem vocês esse projeto não teria sido realizado e medirem esforços para que tudo ocorresse mesmo sem a minha participação em todo o processo devido, a minha gravidez vou carregar para sempre essa admiração por vocês Alex, Brenner, Kamila, Letícia, Nathan, Nathy, Rauander, Vivi e Valdeir. O meu muito obrigada pelo convívio e aprendizado.

Priscila e Lucas Obrigada por desenharem o projeto, definir a área de estudo e análises com tamanho conhecimento e empatia por eu não poder acompanhar todo o processo e vocês sempre me protegendo e preocupados com o meu bem estar gestacional. Grata, Grata.

Aos meus Professores Coorientadores: Althiéris Saraiva, Paulo Eduardo de Menezes e Priscila Batista agradeço por todo aprendizado e contribuições nessa caminhada como também pela oportunidade de trabalhar com admiráveis profissionais.

Agradeço a papai do céu por ter me enviado uma Orientadora Professora Fernanda Farnese tão especial, que me aceitou como sua orientada mesmo com as minhas inúmeras dificuldades que sempre me apoiou, me cobrou “teve muitos motivos”, deu alternativas e possibilidades para desenvolver e concretizar esse projeto. Sou uma mestrelapida por uma profissional incrível. Muito Obrigada!

Por fim, agradeço aos Professores e equipe do Programa de pós graduação em Agroquímica do IF Goiano pela oportunidade de participar e tornar esse sonho realizado. Muito obrigada!

A todos vocês que contribuíram para meu enriquecimento profissional e pessoal, carregarei sempre comigo o meu muito obrigada e que Deus abençoe sempre vocês.

## **BIOGRAFIA DO AUTOR**

Sou Daiany de Almeida Araujo, natural de Barra do Bugres – Mato grosso, nascida em 14 de outubro de 1988, filha de Graciliano Pinto de Araujo e Lourdes Moreira de Almeida, esposa do Jaderson de Oliveira Basílio e mãe da Cecília de Almeida Araujo. Bacharel em agronomia pela Universidade de Rio Verde - Campus Rio Verde no ano de 2019. Em 2020/2 ingressei no mestrado em Agroquímica no Instituto Federal Goiano Verde - Campus Rio Verde; Durante o mestrado fui aluna no Laboratório de Estudos Aplicados em Fisiologia Vegetal “LEAF” nessa mesma instituição.

## ÍNDICE DE TÓPICOS

### Índice

RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	2
1. Introdução.....	3
2. Objetivos.....	5
2.1. Objetivo Geral.....	5
2.2. Objetivos específicos.....	6
3. Material e Métodos.....	6
3.1. Área de estudo e design experimental.....	6
3.2. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a.....	8
3.3. Determinação de pigmentos (clorofila, flavonoides e antocianinas) e índice de balanço de nitrogênio.....	9
3.4. Danos celulares.....	9
3.5. Avaliação do metabolismo antioxidante.....	10
3.6. Avaliação da densidade das árvores.....	10
3.7. Análise estatística.....	11
4. Resultados.....	11
4.1. Alterações fisiológicas.....	11
4.2. Metabólitos e balanço de nitrogênio.....	14
4.3. Dano celular e metabolismo antioxidante.....	16
4.4. Densidade de espécies.....	18
5. Discussão.....	19
6. Conclusões.....	23
7. Referências.....	24

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Vista do Google Maps do Fragmento de Mata (em amarelo) onde as coletas foram realizadas. Na figura é possível visualizar o complexo industrial (vermelho) e a rodovia BR 0-60 (azul). O fragmento de mata se encontra às margens da rodovia e, entre o fragmento e o complexo industrial, há uma distância de aproximadamente 7 quilômetros. ....7
- Figura 2:** Três espécies vegetais que ocorrem no fragmento de Cerrado analisado: *Vochysia tucanorum* (A), *Tachigali vulgares* (B) e *Psidium oblongatum* (C). ....8
- Figura 3.** Concentração de clorofila (A) e taxa de transporte de elétrons (ETR; B) para três espécies ocorrentes em fragmento de Cerrado. Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade. .... 12
- Figura 4.** Parâmetros de trocas gasosas em três espécies vegetais ocorrentes em fragmento de Cerrado. Foram avaliadas a taxa de assimilação líquida do carbono (A, A), a condutância estomática ( $g_s$ , B), a taxa transpiratória (E, C), a razão entre concentração interna e externa de  $CO_2$  ( $C_i/C_a$ , D), a eficiência de carboxilação ( $A/C_i$ , E) e a eficiência no uso da água (A/E, F). Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade. .... 13
- Figura 5:** Índice de flavonoides (A), de antocianinas (B) e índice de balanço de nitrogênio (NBI; C) em três espécies vegetais ocorrentes em área de Cerrado. Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade. .... 15
- Figura 6:** Dano celular e enzimas do metabolismo antioxidante em três espécies vegetais ocorrentes em área de Cerrado. Foram avaliados a concentração de malondialdeído (MDA - A) e a atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD - B), catalase (CAT - C) e peroxidase do Ascorbato (APX - D). Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade. .... 17
- Figura 7:** Densidade de árvores em remanescente do Cerrado em Rio Verde – GO. Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade. .... 18

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Média de três leituras de umidade do solo e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em cada um dos pontos de coleta para as três espécies avaliadas. ....	8
---	---

## RESUMO

ARAÚJO, DAIANY DE ALMEIDA; Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro de 2023. **Potencial de Bioindicação da Poluição do Ar por Plantas Presentes em um Fragmento de Cerrado.** Orientadora: Dr.<sup>a</sup> Fernanda dos Santos Farnese; Coorientadores: Dr. Althiéris de Souza Saraiva, Dr. Paulo Eduardo Menezes Silva e Dr.<sup>a</sup>. Priscila Ferreira Batista.

Emissões de gases por veículos constituem a principal fonte de poluição do ar na maioria dos centros urbanos e a fragmentação de habitats tem exposto espécies arbóreas a concentrações cada vez maiores desses poluentes. O Cerrado encontra-se especialmente ameaçado por esse tipo de impacto ambiental, pois a baixa proteção legal resultou em extensa fragmentação, com consequente maior exposição das árvores à fontes de poluição atmosférica. Esse trabalho objetivou avaliar o impacto da proximidade com fontes de poluição ambiental sobre a fisiologia de três espécies vegetais comumente encontradas em fragmentos de Cerrado. Para isso, coletas foram realizadas em um remanescente do Cerrado no município de Rio Verde, sendo selecionadas duas áreas nesse remanescente: a área 1, localizada às margens da rodovia BR 0-60 e próxima a um distrito industrial; e a área 2, localizada no interior do fragmento. Em cada área foram selecionadas três espécies vegetais, com cinco repetições cada: *Vochysia tucanorum*, *Tachigali vulgaris* e *Psidium oblongatum*. Em cada ponto, foi verificada a radiação fotossinteticamente ativa e a umidade do solo, a fim de garantir que as espécies estavam em condições homogêneas de luz e disponibilidade hídrica. As avaliações foram realizadas durante a estação chuvosa, no mês de novembro de 2021. Foram avaliadas variáveis fotossintéticas, concentração de antocianinas e flavonoides, índice de balanço de nitrogênio, concentração de malondialdeído, atividade de enzimas antioxidantes e densidade das espécies. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas utilizando o teste de T. A proximidade com a rodovia diminuiu a taxa fotossintética das plantas, alterou a concentração de antocianinas e flavonoides, provocou desbalanço no índice de nitrogênio e aumentou a ocorrência de danos celulares, o que, por sua vez, resultou em decréscimo na densidade de espécies. Esses dados apontam para a possibilidade de utilizar as espécies vegetais aqui avaliadas em programas de biomonitoramento ambiental e demonstram o risco da fragmentação de habitats e da antropização para a conservação da biodiversidade do Cerrado.

**Palavras-chave:** Biomonitoramento; tráfego de veículos; fragmentação; conservação; biodiversidade.

## ABSTRACT

ARAÚJO, DAIANY DE ALMEIDA; Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro de 2023. **Potential for Bioindications of Air Pollution by Plants Present in a Fragment of Cerrado.** Orientadora: Dr.<sup>a</sup> Fernanda dos Santos Farnese; Coorientadores: Dr. Althiéris de Souza Saraiva, Dr. Paulo Eduardo Menezes Silva e Dr.<sup>a</sup>. Priscila Ferreira Batista

Gas emissions from vehicles are the main source of air pollution in most urban centers and habitat fragmentation has exposed tree species to ever-increasing concentrations of atmospheric pollutants. The Cerrado is especially threatened by this type of environmental impact, as the low legal protection has resulted in extensive fragmentation, with consequent greater exposure of trees to sources of atmospheric pollution. This study aimed to evaluate the impact of proximity to sources of environmental pollution on the physiology of three plant species commonly found in Cerrado fragments. For this, sampling was carried out in a remnant of Cerrado in the municipality of Rio Verde, with two areas being selected in this remnant: area 1, located on the edge of the BR 0-60 highway and close to an industrial district; and area 2, located inside the fragment. In each area, three plant species were selected, with five replications each: *Vochysia tucanorum*, *Tachigali vulgares*, and *Psidium oblongatum*. At each point, the photosynthetically active radiation and soil moisture were analyzed to ensure that the species were in homogeneous conditions of light and water availability. The evaluations were carried out during the rainy season, in November 2021. Photosynthetic variables, the concentration of anthocyanins and flavonoids, nitrogen balance index, malondialdehyde concentration, activity of antioxidant enzymes, and species density were evaluated. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and means were compared using the T test. Proximity to the highway decreased the photosynthetic rate of the plants, altered the concentration of anthocyanins and flavonoids, caused an imbalance in the nitrogen content and increased the occurrence of cellular damage, which, in turn, resulted in a decrease in the species density. These data point to the possibility of using the plant species evaluated here in environmental biomonitoring programs and demonstrate the risk of habitat fragmentation and anthropization for the conservation of Cerrado biodiversity.

**Keywords:** Biomonitoring; vehicle traffic; fragmentation; conservation; biodiversity

## 1. Introdução

As ações antrópicas na natureza ao longo das últimas décadas causaram uma série de desbalanços ambientais capazes de alterar significativamente o complexo equilíbrio em domínios de todo o mundo. Dentre esses impactos, pode-se destacar a rápida urbanização e industrialização, as quais resultaram no aumento exacerbado da liberação de gases tóxicos na atmosfera, culminando na poluição do ar e comprometendo a saúde humana, a conservação da biodiversidade e acarretando o decréscimo de diversas populações de espécies (Liu et al., 2016; Tovar-Sánchez et al., 2018). O grupo mais expressivo de poluentes atmosféricos são conhecidos como poluentes orgânicos persistentes, que são compostos liberados entre as fases gasosas, líquidas e particuladas, por meio de diversas fontes de combustão, como a queima de combustíveis fósseis, biomassa e emissões naturais (Barbas et al., 2018).

A emissões de gases por meio de veículos constituem a principal fonte de poluição do ar na maioria dos centros urbanos. Quatro poluentes principais são liberados de escapamento de veículos automotores, evaporação de combustível e solvente: monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (COVs), que através das reações químicas sofridas no ar são transformados em partículas (Hao et al., 2021). Com a grande presença de veículos com motores a diesel em países industrializados, as partículas de exaustão de diesel contribuem com até 90% do material particulado atmosférico (Aikes, 2019). Em 2014, o transporte como um todo foi responsável por um total de 23% das emissões de CO<sub>2</sub> pela combustão de combustível fóssil, sendo que o transporte rodoviário foi responsável por 20% da liberação CO<sub>2</sub> na atmosfera em todo o mundo (Agência Internacional de Energia, 2016). As atividades industriais e o tráfego de veículos que utilizam combustíveis fósseis contribuem com 65% das emissões globais de gases para o efeito estufa, onde esses gases tem a capacidade de reter calor na atmosfera com contribuição significativa para o aumento da temperatura e o aquecimento global (IPCC, 2014).

Os COVs, que são emitidos principalmente pela exaustão de veículos, possuem uma forte capacidade de oxidação troposférica, balanço radiativo e deterioração a qualidade do ar (Yadav et al., 2019). Dessa forma, a liberação desses poluentes incorre em riscos à saúde humana, aumentando a probabilidade de as pessoas desenvolverem graves doenças, como câncer ou outros problemas que atacam os sistemas respiratório, neurológico e reprodutivo (Li et al., 2018). Em adição, compostos atmosféricos também compromete todo o ecossistema, afetando microrganismos, plantas e animais e, portanto,

ameaçando a sustentabilidade das funções ecossistêmicas (Mishra e Baragava, 2016). Alguns domínios brasileiros são particularmente ameaçados pela poluição atmosférica, como é o caso do Cerrado.

O Cerrado é o segundo maior domínio brasileiro e abriga mais de 12.400 espécies vegetais, sendo muitas delas endêmicas, o que faz com que ele seja considerado um dos grandes *hotspots* mundiais de biodiversidade (Strassburg et al., 2017). Apesar disso, o Cerrado é a savana tropical mais ameaçada no mundo, principalmente por fatores como a expansão do agronegócio e a baixa proteção legal (Sano et al., 2019). Como efeito, o Cerrado perdeu aproximadamente 50% da sua área nativa e, entre agosto de 2019 e julho de 2020, 7.340 km<sup>2</sup> de vegetação nativa foram removidas, representando um aumento de 13% no desmatamento em relação ao ano anterior (Assis et al., 2021). Como consequência, uma parcela significativa da vegetação nativa do Cerrado ficou restrita a fragmentos que se encontram cercados por atividades agropecuárias, indústrias, cidades e rodovias. Essa maior proximidade com fluxo de veículos, pessoas e compostos liberados por atividades industriais e agrícolas representa uma maior exposição da biodiversidade do Cerrado a poluentes atmosféricos diversos, os quais podem impactar processos ecossistêmicos e resultar na perda de biodiversidade.

A maior parte dos poluentes atmosféricos entram nas plantas por meio de pequenas aberturas localizadas na epiderme das folhas, os estômatos. Os estômatos são estruturas capazes de se abrir e fechar para regular a entrada de CO<sub>2</sub> e saída de vapor de água para as atividades fotossintéticas e transpiratórias (Mesquita et al., 2013). Essas estruturas, no entanto, também funcionam como a porta de entrada de gases tóxicos, os quais atingem os espaços intracelulares da folha e podem entrar dentro das células, com capacidade de degradação de lipídios e inibição da atividade enzimática, comprometendo diversos processos fisiológicos (Baumbach, 2012). A absorção de poluentes atmosféricos pode colapsar a estrutura da célula, o que frequentemente resulta da produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs), as quais danificam lipídeos, proteínas e ácidos nucleicos (Patel e Parida, 2021; Abu-Shahba et al., 2022). Dessa forma, uma resposta comumente observada em plantas expostas a poluentes atmosféricos consiste justamente no fechamento estomático, o qual, por sua vez, impacta diretamente o processo fotossintético, devido a menor difusão de CO<sub>2</sub>, aumento da temperatura da folha e diminuição da taxa de transpiração (Pereira et al., 2009).

Embora a absorção dos compostos tóxicos seja uma ameaça à biodiversidade, a capacidade das plantas para absorver poluentes atmosféricos pode ser utilizada em

programas de biomonitoramento ambiental. O biomonitoramento ambiental consiste em um método prático e complementar ao estudo e controle da qualidade do ar. Com efeito, o tipo e a quantidade dos poluentes interceptados pelas plantas geram alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, as quais podem ser específicas ou generalistas e podem fornecer informações sobre a presença de poluentes atmosféricos e o seu impacto na biota (Li et al., 2018). Para que uma espécie possa ser utilizada em programas de biomonitoramento, a mesma deve possuir uma representatividade relevante na área de estudo, deve ser sensível ao poluente ou desenvolver níveis de tolerância através de alterações em moléculas ou processos, deve estar presente na área durante todo o ano e, preferencialmente, deve ser de fácil coleta e manuseio (Nunes, 2009). O biomonitoramento comumente demanda a utilização de biomarcadores de poluição ambiental. Um biomarcador é qualquer resposta biológica ao estresse estudado, incluindo respostas em nível molecular, bioquímico, fisiológico, anatômico ou morfológico. Quanto menor o nível avaliado, geralmente mais rápida é a resposta observada (Mukherjee et al., 2019).

Tendo em vista a importância do Cerrado para a conservação da biodiversidade, e considerando a ameaça que a fragmentação e a consequente exposição a poluentes atmosféricos representa para a vegetação deste Domínio, esse trabalho objetivou avaliar o impacto da proximidade com fontes de poluição ambiental sobre a fisiologia de três espécies vegetais comumente encontradas em fragmentos de Cerrado: *Vochysia tucanorum*, *Tachigali vulgares* e *Psidium oblongatum*. O trabalho testou as seguintes hipóteses: *i*) plantas localizadas na borda do fragmento sofrem maiores perturbações em seu metabolismo devido a maior proximidade com atividades antrópicas em comparação com as plantas que se localizam no interior da mata; e *ii*) as alterações anatômicas e metabólicas em resposta à proximidade com as atividades antrópicas permite a utilização de espécies vegetais do Cerrado em programas de biomonitoramento ambiental. Os resultados desse trabalho, além de fornecerem importantes informações sobre o biomonitoramento da qualidade do ar, também são importantes para avaliar o impacto da poluição atmosférica sobre a biodiversidade florística do Cerrado.

## **2. Objetivos**

### ***2.1. Objetivo Geral***

O estudo teve como objetivo avaliar o impacto da proximidade com atividades

antrópicas sobre o metabolismo vegetal, verificando as alterações anatômicas, fisiológicas e bioquímicas em três espécies arbóreas/arbustivo de alta abundância em mata do Cerrado, caracterizando o potencial dessas espécies para programas de biomonitoramento ambiental.

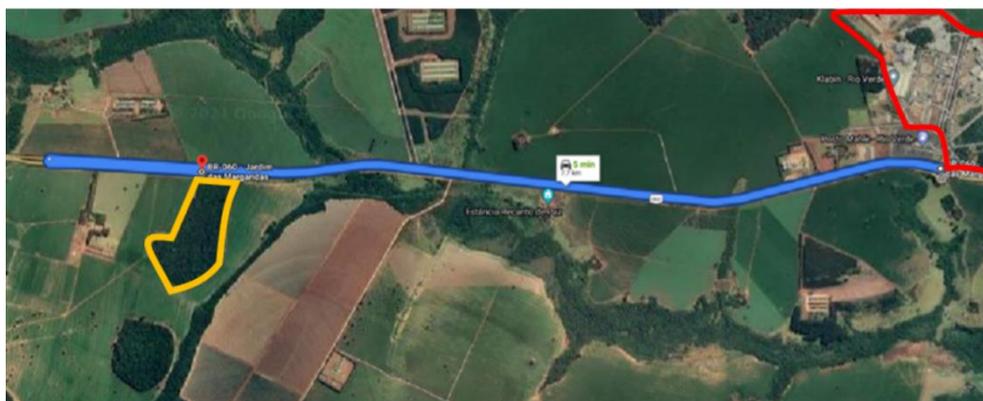
## ***2.2. Objetivos específicos***

- Avaliar o potencial de espécies arbóreas encontradas no Cerrado para o monitoramento do efeito da proximidade com atividades antrópicas em remanescentes do Domínio Cerrado;
- Verificar o efeito da proximidade com atividades antrópicas sobre as características anatômicas, fisiológicas e bioquímicas de espécies relevantes no Cerrado, determinando possíveis biomarcadores;
- Determinar o efeito da proximidade com áreas antrópicas sobre a densidade de árvores no Cerrado;
- Contribuir com a formação de recursos humanos.

## **3. Material e Métodos**

### ***3.1. Área de estudo e design experimental***

A área em estudo se localiza no município de Rio Verde e pertence a fazenda Coqueiros, que possui uma mata nativa com espécies do Domínio Cerrado. A área de mata nativa compreende aproximadamente 26,7 ha, sendo que sua borda se localiza às margens da rodovia BR 0-60, a qual possui alto fluxo de veículos, além de estar próxima de áreas de plantações e de indústrias diversas (a área está localizada a 7 km do distrito industrial, latitude -17,8248 e longitude -51,0506). Dessa forma, as espécies localizadas nessa área de mata nativa, sobretudo, aquelas estabelecidas na borda do fragmento, estão expostas a diferentes fontes de poluição atmosférica em decorrência de atividades humanas variadas, destacando-se o tráfego de veículos.



**Figura 1.** Vista do Google Maps do Fragmento de Mata (em amarelo) onde as coletas foram realizadas. Na figura é possível visualizar o complexo industrial (vermelho) e a rodovia BR 0-60 (azul). O fragmento de mata se encontra às margens da rodovia e, entre o fragmento e o complexo industrial, há uma distância de aproximadamente 7 quilômetros.

A fim de avaliar o efeito da poluição atmosférica sobre as espécies relevantes no Cerrado, foram selecionadas 3 espécies vegetais: *Vochysia tucanorum*, *Tachigali vulgaris* e *Psidium oblongatum* (Figura 2). Essas espécies foram escolhidas pela sua ocorrência na área amostral. Foram escolhidos 2 pontos de coleta dentro da mata nativa da fazenda Coqueiros, sendo a primeira área 2 metros após a borda da mata e próximo à rodovia (Área 1) e a segunda área 20 metros após o primeiro ponto, em direção ao centro da mata (Área 2). Em cada ponto, foi verificada a radiação fotossinteticamente ativa (sensor de radiação - Decagon Devices) e a umidade do solo (sensor de umidade do solo - HydroSense II Handheld), a fim de garantir que as espécies estavam em condições homogêneas de luz e disponibilidade hídrica (Tabela 1). As avaliações e coletas foram realizadas durante a estação chuvosa, no mês de novembro de 2021, e estão descritas nos próximos tópicos. Em cada ponto foram avaliadas 5 repetições (5 indivíduos) de cada uma das espécies estudadas, sendo os indivíduos uniformizados em relação ao tamanho da planta e da copa.



**Figura 2:** Três espécies vegetais que ocorrem no fragmento de Cerrado analisado: *Vochysia tucanorum* (A), *Tachigali vulgares* (B) e *Psidium oblongatum* (C).

**Tabela 1:** Média de três leituras de umidade do solo e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em cada um dos pontos de coleta para as três espécies avaliadas.

Espécie	% Umidade solo		PAR	
	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2
<i>V. tucanorum</i>	20,4	17,8	124,69	106,27
<i>T. vulgares</i>	16,7	19,7	98,38	109,92
<i>P. oblongatum</i>	22,3	18,8	95,92	89,61

### 3.2. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*

As avaliações fisiológicas foram realizadas no período das 8:30 às 11 horas da manhã. As trocas gasosas e a fluorescência da clorofila *a* foram medidas em uma folha totalmente expandida utilizando um analisador de gás infravermelho (IRGA, modelo Li-6400xt, Li-cor, Nebraska, EUA). A taxa de assimilação líquida do carbono ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), e transpiratória ( $E$   $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $g_s$ ,  $\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), relação entre a concentração interna e externa de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ ), eficiência de carboxilação instantânea ( $A/C_i$ ) e a eficiência intrínseco do uso da água ( $A/g_s$ ) (Ribeiro et al., 2009), foram determinadas sob radiação fotossinteticamente ativa constante (PAR,

1000  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), concentra\u00e7\u00e3o de  $\text{CO}_2$  ( $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ), temperatura ( $\sim 25,5^\circ\text{C}$ ) e umidade relativa ambiente ( $\sim 80\%$ ). Os par\u00e2metros de fluoresc\u00eancia da clorofila *a* foram obtidos para obter a fluoresc\u00eancia de estado estacion\u00e1rio (F) e posteriormente, um pulso de satura\u00e7\u00e3o foi aplicado para obter a fluoresc\u00eancia m\u00e1xima em um estado adaptado \u00e0 luz ( $F_m'$ ). O rendimento qu\u00e2ntico efetivo do fotossistema II (PSII),  $\Phi_{\text{PSII}} = (F_m' - F) / F_m'$  foram calculados de acordo com Genty et al. (1989). O  $\Phi_{\text{PSII}}$  foi usado para calcular a taxa de transporte de el\u00e9trons,  $\text{ETR} = \Phi_{\text{PSII}} \cdot \text{PAR} \cdot L_{\text{leafABS}} \cdot 0,5$  (Bilger et al., 1990). Aqui, PAR define o fluxo de f\u00f3tons ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) nas folhas,  $L_{\text{leafABS}}$ . \u00c9 a fra\u00e7\u00e3o da luz incidente que \u00e9 absorvida pelas folhas e 0,5 \u00e9 a fra\u00e7\u00e3o da energia de excita\u00e7\u00e3o direcionada para o PSII.

### ***3.3. Determina\u00e7\u00e3o de pigmentos (clorofila, flavonoides e antocianinas) e \u00edndice de balan\u00e7o de nitrog\u00eanio***

Foi utilizado um sensor port\u00e1til para estimar em tempo real e de forma n\u00e3o destrutiva o \u00edndice de clorofila, flavonoides e antocianinas. O teor dos pigmentos foi determinado utilizando-se o sensor \u00f3ptico Dualex (FORCE-A, Orsay, Fran\u00e7a) em folhas totalmente expandidas e expostas ao sol. O \u00edndice de balan\u00e7o de nitrog\u00eanio (NBI) foi calculado a partir dos dados m\u00e9dios de clorofila total e flavonoides de cada folha (Goulas et al., 2004).

### ***3.4. Danos celulares***

A concentra\u00e7\u00e3o de alde\u00eddo mal\u00f4nico (MDA) foi determinada estimando-se as subst\u00e2ncias reativas ao \u00e1cido 2-tiobarbit\u00farico (TBA), sendo os resultados expressos em equivalentes de alde\u00eddo mal\u00f4nico (Cakmak e Horst, 1991). O tecido foliar (0,25 g) foi macerado na presen\u00e7a de nitrog\u00eanio l\u00edquido e homogeneizado com 0,1% (p/v) de \u00e1cido tricloroac\u00e9tico (TCA) e 20% de polivinilpirrolidona. O homogenato foi centrifugado a  $15.000 \times g$  por 15 min a  $4^\circ\text{C}$ . Uma al\u00edquota de 0,5 mL do sobrenadante foi adicionada a 1,5 mL de 0,5% de \u00e1cido 2-tiobarbit\u00farico (TBA) (preparado em 20% de TCA). As amostras foram homogeneizadas e a rea\u00e7\u00e3o colorim\u00e9trica conduzida a  $90^\circ\text{C}$  por 20 min, ap\u00f3s incubação em banho-maria. A seguir, as amostras foram imersas em banho de gelo e clarificadas atrav\u00e9s de centrifuga\u00e7\u00e3o a  $15000 \times g$  por 15 min a  $4^\circ\text{C}$ . A absorb\u00e2ncia das amostras foi lida em espectrofot\u00f4metro a 532 nm e a absorb\u00e2ncia inespec\u00edfica (660 nm)

foi lida e descontada. A peroxidação de lipídios foi estimada como conteúdo total de substâncias reativas ao TBA e expressa como equivalentes de MDA. O coeficiente de extinção molar do MDA ( $155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) foi utilizado para os cálculos e os resultados expressos como  $\text{nmol g}^{-1} \text{ MF}$ .

### ***3.5. Avaliação do metabolismo antioxidante***

Para determinar a atividade das enzimas dismutases do superóxido (SOD, EC 1.15.1.1), peroxidases (APX, EC 1.11.1.11) e catalases (CAT, EC 1.11.1.6), amostras foliares de aproximadamente 0,3 g foram maceradas em nitrogênio líquido e homogeneizadas em meio de extração contendo tampão fosfato de potássio 0,1 M, pH 6,8, EDTA 0,1 mM, fluoreto de fenilmetilsulfônico (PMSF) 1 mM e polivinilpirrolidona (Peixoto et al., 1999); Os homogenatos foram centrifugados a  $12.000 \times g$  por 15min, a  $4^\circ\text{C}$ . Os sobrenadantes foram utilizados como extrato enzimático bruto e as atividades enzimáticas foram determinadas pela adição do extrato aos seguintes meios de reação:

- Tampão fosfato de sódio 50 mM, pH 7,8, metionina 13 mM, azul de p-nitrotetrazólio (NBT)  $75 \mu\text{M}$ , EDTA 0,1 mM e riboflavina  $2 \mu\text{M}$ , para SOD (Giannopolitis e Ries, 1977);
- Tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 6,0, ácido ascórbico 0,8 mM e  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 mM, para APX (Peixoto et al., 1999);
- Tampão fosfato de potássio 50 mM e  $\text{H}_2\text{O}_2$  12,5 mM, para CAT (Peixoto et al., 1999).

Para determinação da atividade da SOD, as amostras foram iluminadas por 5 min e a absorvância foi, então, medida a 560 nm. Uma unidade de SOD foi definida como a quantidade de enzima necessária para reduzir em 50% a fotoredução do NBT (Giannopolitis e Ries, 1977). As atividades das enzimas APX e CAT foram estimadas pela leitura da absorvância durante o primeiro minuto de reação. Os seguintes coeficientes de extinção molar foram utilizados: APX (290 nm,  $\epsilon$ :  $2,8 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ); e CAT (240 nm,  $\epsilon$ :  $36 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) (Peixoto et al., 1999).

### ***3.6. Avaliação da densidade das árvores***

Para determinar a densidade de cada uma das espécies analisadas nesse estudo, foi realizado um levantamento florístico na Área 1 e na Área 2. Para isso, foram

demarcados em cada área 3 quadrantes com 2 m<sup>2</sup>, sendo que cada quadrante estava a 10 metros de distância em relação ao próximo. Em cada quadrante foram identificadas e contadas cada indivíduo pertencente a uma das três espécies analisadas neste trabalho.

### **3.7. Análise estatística**

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, compondo o fatorial 3x2, sendo: 3 espécies e 2 locais, com 5 repetições, totalizando 30 unidades experimentais. Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias comparadas utilizando o teste de T, a 5% de probabilidade. Para cada variável, comparou-se cada espécie na borda (Área 1) com a mesma espécie no centro do fragmento (Área 2) (barras inferiores nos gráficos). Em seguida, os valores médios das três espécies (em conjunto) para cada variável foram comparados entre as áreas (barras superiores nos gráficos). As análises estatísticas e os gráficos foram realizados utilizando-se o programa estatístico R (R Studio, 2013).

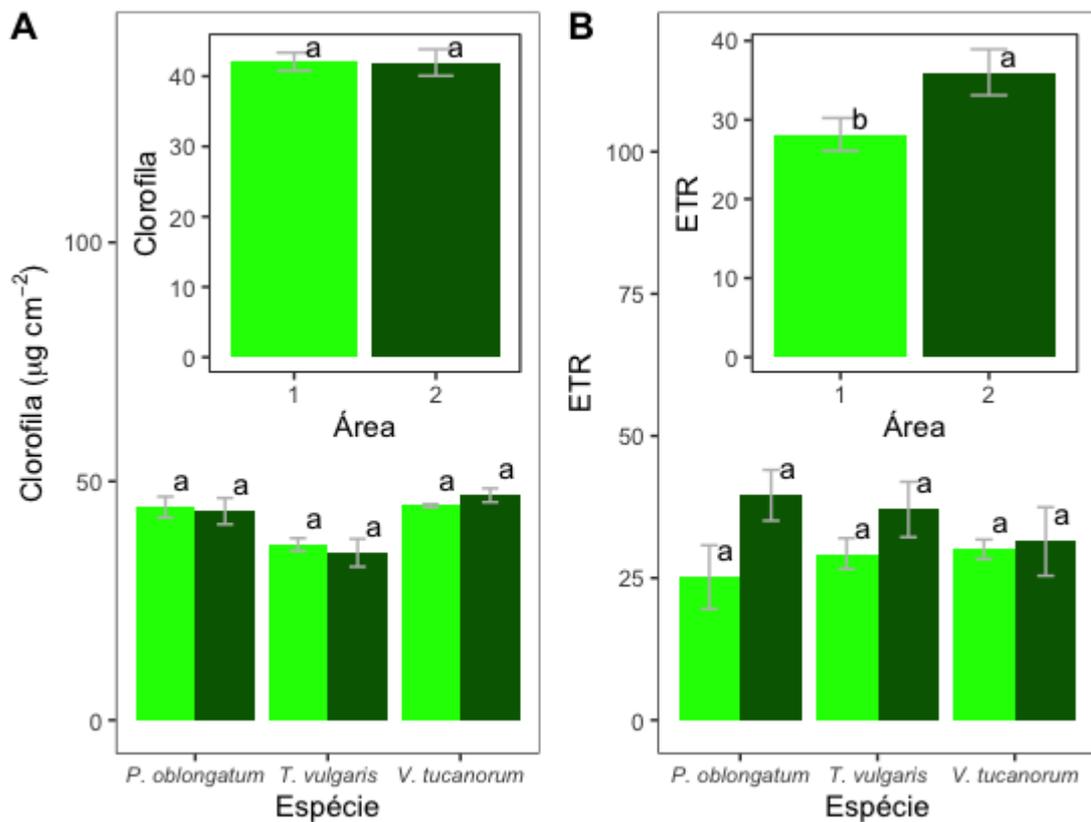
## **4. Resultados**

### **4.1. Alterações fisiológicas**

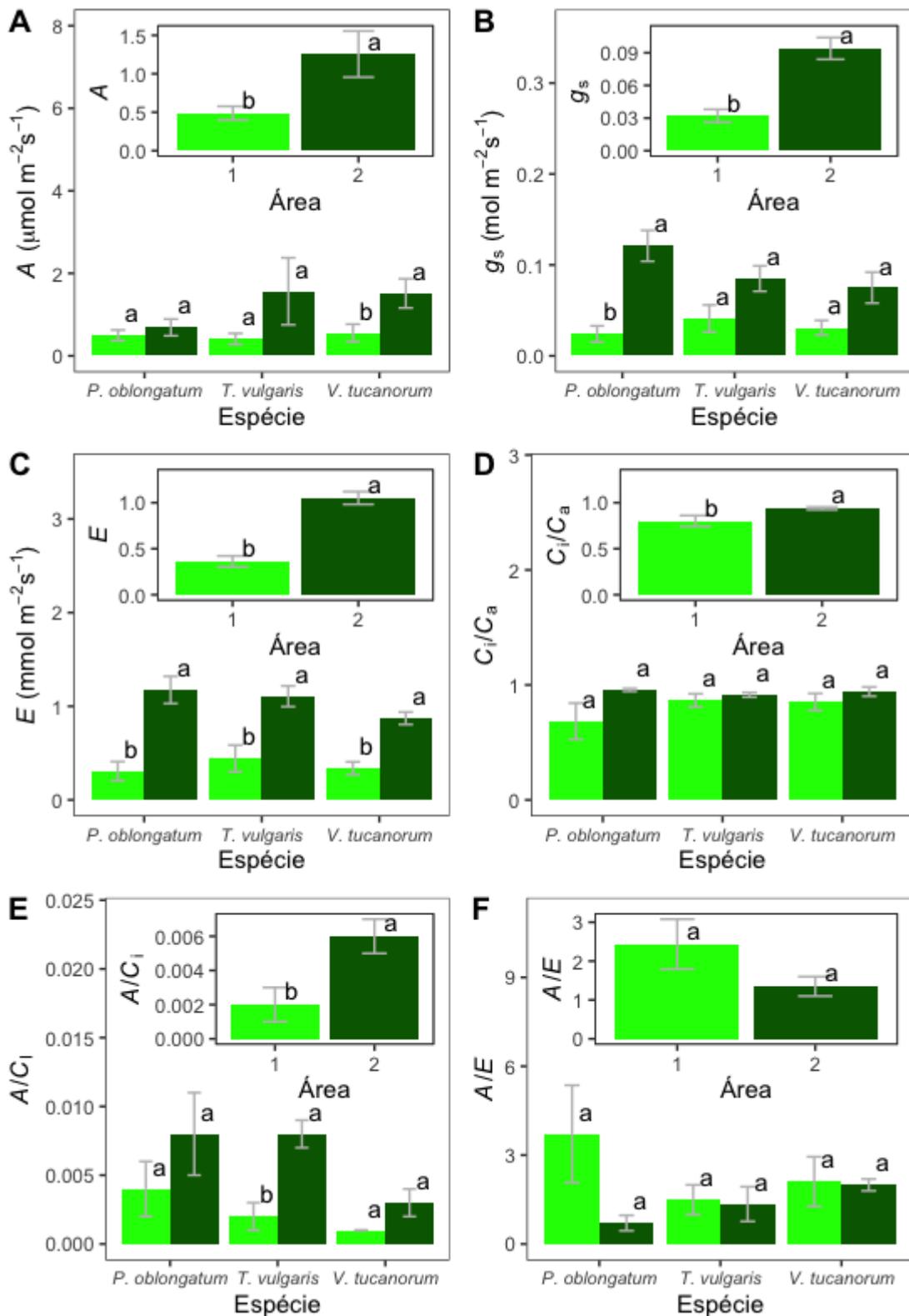
A maior proximidade com atividades antrópicas, sobretudo com o tráfego de veículos e atividades industriais, alterou diversos aspectos da fisiologia vegetal das espécies avaliadas nesse estudo. Embora não tenham sido observadas alterações para a concentração de clorofilas (Fig. 3A) e nem para a taxa de transporte de elétrons (ETR; Fig. 3B) entre as espécies, ao avaliar-se as áreas observou-se que na área 1 a taxa de transporte de elétrons foi menor do que na área 2.

Em relação aos parâmetros de trocas gasosas, observou alterações praticamente todas as variáveis. Com efeito, o mesmo padrão de resposta foi obtido para as variáveis taxa de assimilação líquida do carbono ( $A$ ), a condutância estomática ( $g_s$ ), a taxa transpiratória ( $E$ ), a razão entre concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> ( $C_i/C_a$ ) e a eficiência de carboxilação ( $A/C_i$ ) (Fig. 4A-E), os quais foram sempre menores na área 1 em comparação com a área 2. Ao avaliar-se cada espécie isoladamente, no entanto, não foi possível identificar claramente nenhum tipo de padrão. Por exemplo, apenas *Vochysia tucanorum* apresentou alterações significativas entre as áreas em relação à  $A$ , enquanto *Pisidium oblongatum* e *Tachigali vulgaris* apresentaram, respectivamente, menores valores de  $g_s$  ou de  $A/C_i$  na área 1. Todas as espécies tiveram maior  $E$  na área 2, embora

a eficiência no uso da água não tenha se alterado entre espécies ou entre as áreas (Fig. 4F).



**Figura 3.** Concentração de clorofila (A) e taxa de transporte de elétrons (ETR; B) para três espécies ocorrentes em fragmento de Cerrado. Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade.

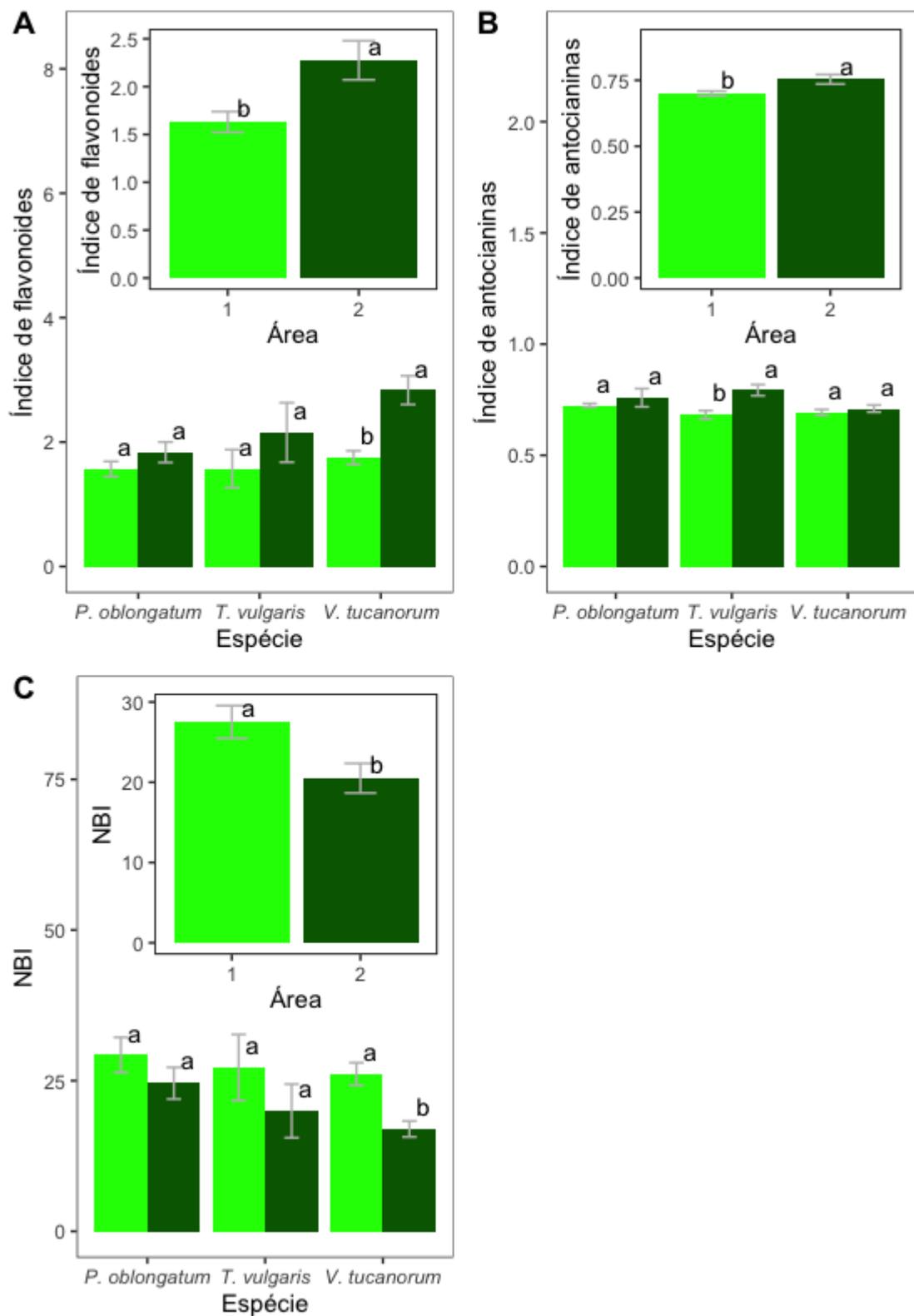


**Figura 4.** Parâmetros de trocas gasosas em três espécies vegetais ocorrentes em fragmento de Cerrado. Foram avaliadas a taxa de assimilação líquida do carbono ( $A$ , A), a condutância estomática ( $g_s$ , B), a taxa transpiratória ( $E$ , C), a razão entre concentração interna e externa de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ , D), a eficiência de carboxilação ( $A/C_i$ , E) e a eficiência no uso da água ( $A/E$ , F). Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as

barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade.

#### ***4.2. Metabólitos e balanço de nitrogênio***

A espécie *V. tucanorum* foi a única que apresentou alteração no índice de flavonoides entre as áreas, enquanto em *T. vulgaris* a alteração ocorreu no índice de antocianinas, sendo que, em ambos os casos, os maiores valores foram observados na área 2 (Fig. 5A e B). Em relação ao índice de balanço de nitrogênio (NBI, Fig. 5C), houve queda nesse parâmetro nos espécimes de *V. tucanorum* localizados na área 2, enquanto para as demais espécies não foram constatadas diferenças. Ao avaliar-se a média das espécies em cada áreas (barras superiores), as espécies da área 1 apresentaram menores índices de flavonoides e antocianinas, sendo padrão oposto observado em relação ao NBI.



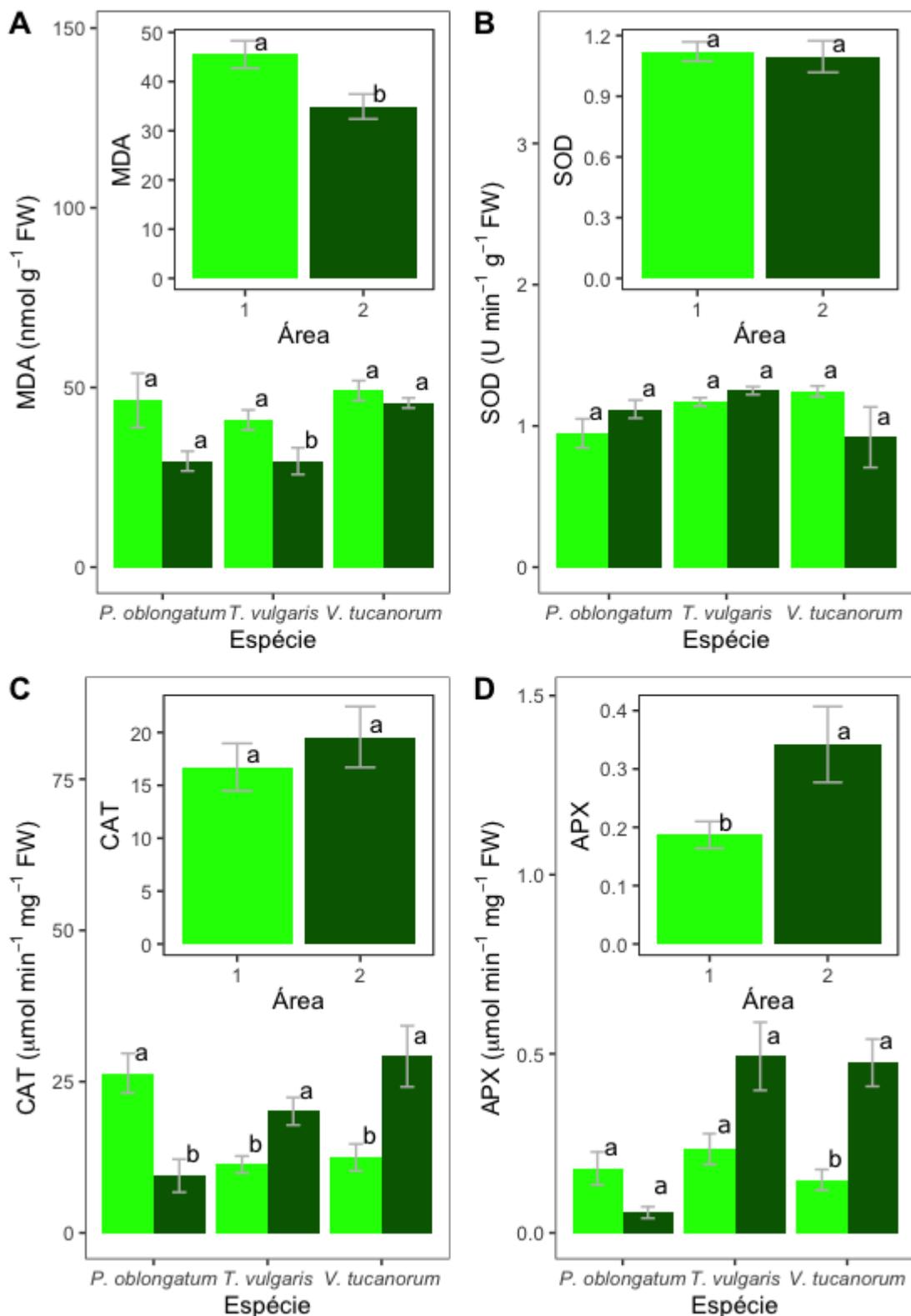
**Figura 5:** Índice de flavonoides (A), de antocianinas (B) e índice de balanço de nitrogênio (NBI; C) em três espécies vegetais ocorrentes em área de Cerrado. Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros

representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade.

#### ***4.3. Dano celular e metabolismo antioxidante***

Para a variável concentração de MDA nas espécies avaliadas isoladamente, só foi possível observar diferença para *T. vulgaris*, que apresentou menor valor no interior do fragmento, em comparação com a borda (Fig. 6A). Quando se comparou média das espécies entre as áreas, foi possível observar menor valor de MDA na Área 2.

Não houve diferença significativa para a atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) com as espécies avaliadas isoladamente ou em conjunto (Fig. 6B). Já a atividade da enzima catalase (CAT) variou entre as espécies, embora entre as áreas não tenha ocorrido nenhuma diferença. As espécies *T. vulgaris* e *V. tucanorum* apresentaram maior atividade da CAT quando localizadas na Área 2, com padrão oposto sendo observado *P. Oblongatum* (Fig. 6C). Já para a enzima peroxidase do Ascorbato (APX) apenas *V. tucanorum* apresentou maior atividade no centro do que na borda do fragmento (Fig. 6D). A atividade da APX também foi maior no centro do fragmento quando somados os valores das três espécies (barras superiores).

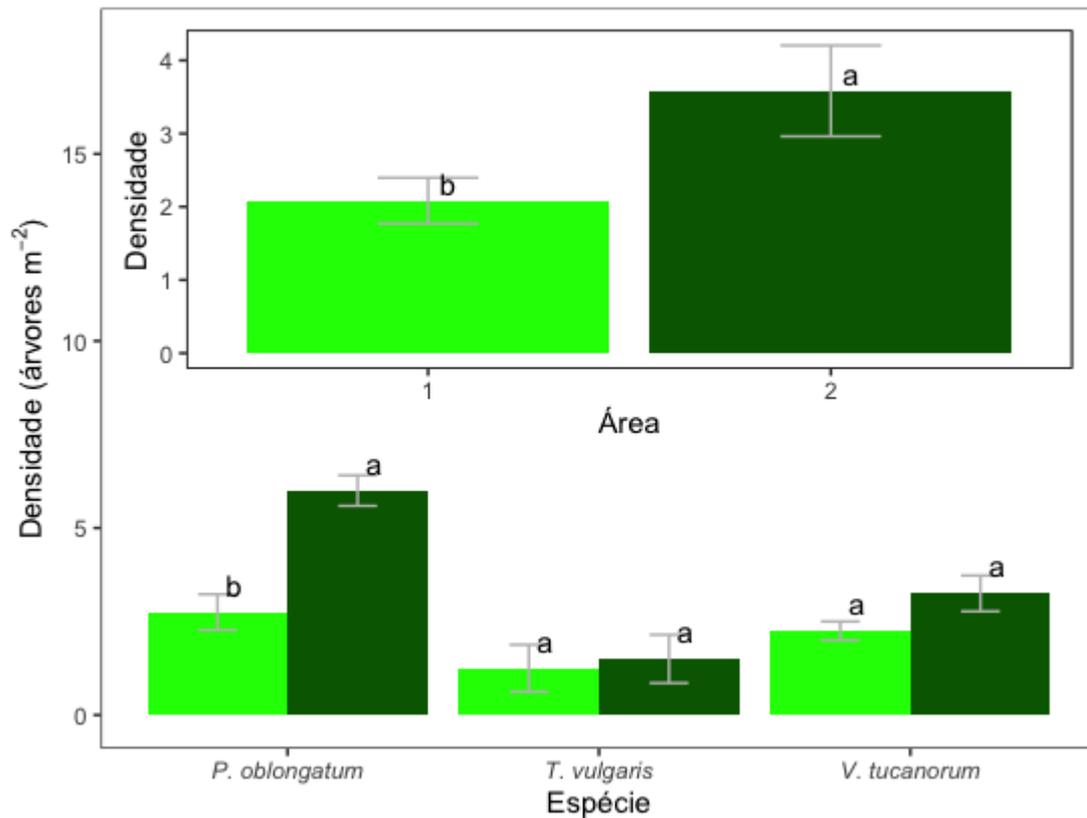


**Figura 6:** Dano celular e enzimas do metabolismo antioxidante em três espécies vegetais ocorrentes em área de Cerrado. Foram avaliados a concentração de malondialdeído (MDA - A) e a atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD - B), catalase (CAT - C) e peroxidase do Ascorbato (APX - D). Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três

espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade.

#### 4.4. Densidade de espécies

Em relação a densidade de espécies, apenas *P. oblongatum* apresentou maior densidade no interior do fragmento, não sendo observadas alterações para as demais espécies (Fig. 7). No entanto, quando as espécies foram avaliadas em conjunto, foi possível verificar maior densidade na área 2 em comparação com a área 1.



**Figura 7:** Densidade de árvores em remanescente do Cerrado em Rio Verde – GO. Em cada gráfico, as barras inferiores mostram a comparação para cada espécie entre a área 1 (próxima à rodovia) e a área 2 (interior do fragmento); e as barras superiores mostram a comparação dos valores médios das três espécies agrupadas em cada área. As barras verde-claros representam a área 1 e as barras verde-escuros são da área 2. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si de acordo com o Teste T, a 0,05% de probabilidade.

## 5. Discussão

O Cerrado brasileiro é considerado um dos *hotspots* mundiais de biodiversidade. No entanto, a vegetação do Cerrado se encontra ameaçada por fatores diversos, como a fragmentação e a proximidade com atividades antrópicas, as quais liberam no ar compostos tóxicos que podem comprometer o crescimento e desenvolvimento vegetal, podendo, inclusive, culminar com a morte da planta (De Faria et al., 2007, Rodrigues et al., 2017). No presente estudo avaliamos como a proximidade de espécies vegetais com centros industriais e tráfego de veículos pode comprometer a fisiologia vegetal de três espécies vegetais. Os resultados obtidos apontam para sensibilidade das espécies às atividades antrópicas, fornecendo dados que reforçam a necessidade de proteção legal do Cerrado, além de indicar espécies com potencial para serem utilizadas como biomonitoras de poluição atmosférica.

A fotossíntese é um parâmetro chave na fisiologia da planta, que integra vários outros processos e fornece uma visão geral do fitness vegetal. Por essa razão, parâmetros fotossintéticos representam ferramentas valiosas para avaliações de risco ambiental (Silva et al., 2022). A poluição atmosférica comumente resulta na degradação de pigmentos fotossintéticos, o que, por sua vez, diminuiu a taxa fotossintética (Rai et al., 2016). Essa alteração não foi observada para as espécies analisadas nesse estudo, as quais mantiveram o mesmo conteúdo de clorofila, independente da sua localização. No entanto, a manutenção dos níveis de clorofila quando a taxa de carboxilação diminui, como ocorreu na área 1, pode resultar em um excesso de energia luminosa, que pode favorecer a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Foyer e Shigeoka, 2011). As clorofilas, ao absorver energia luminosa além do necessário para a atividade fotossintética, podem desencadear um superaquecimento, desequilíbrio nas reações fotoquímicas e danos aos fotossistemas, decorrente da formação de EROs, como oxigênio singleto, radicais de ânion superóxido e hidroxila (Gil, 2019, Hasanuzzaman 2020). Os menores valores para a taxa de transporte de elétrons nas plantas localizadas às margens da rodovia corroboram essa hipótese e apontam para a ocorrência de danos aos componentes dos fotossistemas. Alternativamente, a menor taxa de transporte de elétrons na área 1 pode ser decorrente da menor absorção de luz causada pelo acúmulo de materiais particulados na superfície das folhas, conforme observado em *Quercus ilex* (Fusaro et al., 2017).

A proximidade com as margens da rodovia também impactou negativamente a segunda etapa da fotossíntese, diminuindo a taxa de assimilação líquida de carbono em

63,39% na espécie *V. tucanorum*, 73,71% em *T. vulgares* e 27,85% em *P. oblongatum*. Em estudos realizados por Rodrigues et al. (2018), a exposição direta de murici ao fluoreto de potássio, por chuva simulada nas folhas, reduziu a atividade fotossintética em 62% na maior dose. Em plantas de açafão localizadas ao longo de uma rodovia, foram observadas reduções na atividade fotossintética, carboidratos e proteínas devido à absorção de partículas tóxicas pelos estômatos (Mir et al., 2021). Esses estudos corroboram os dados encontrados aqui e reforçam o impacto negativo de poluentes atmosféricos na fisiologia vegetal.

A menor condutância estomática observada na área 1 (borda do fragmento) foi um dos fatores responsáveis pela queda na fotossíntese. Os estômatos são estruturas epidérmicas que funcionam como válvulas que regulam as trocas gasosas entre o interior da folha e a atmosfera e, quando estão abertos, permitem a entrada de CO<sub>2</sub>, o qual será direcionado para a produção dos fotoassimilados (Pacheco, 2021). No entanto, embora seja essencial para a absorção de CO<sub>2</sub> pelas folhas, os estômatos também representam a principal rota de entrada de poluentes atmosféricos nos tecidos vegetais (Raggi, 2020). Dessa forma, um dos primeiros mecanismos de defesa de plantas expostas a poluentes atmosféricos consiste justamente no fechamento estomático, com consequente queda na fixação de carbono (Hoshika et al., 2020). As plantas localizadas mais internamente no fragmento, por outro lado, conseguiram manter seus estômatos abertos, uma vez que estavam mais distantes das fontes de poluição, o que se refletiu em manutenção do processo fotossintético. Cabe salientar que, além da poluição, outros fatores ambientais, como intensidade luminosa e disponibilidade hídrica, também podem impactar o comportamento estomático. Essas variáveis, no entanto, não apresentaram diferença entre as duas áreas estudadas e, portanto, não explicam a variação observada em  $g_s$ . Em adição ao efeito estomático, a menor taxa de transporte de elétrons nas espécies localizadas às margens da rodovia provavelmente também contribuiu para a queda observada na fixação de CO<sub>2</sub>.

Os menores valores de  $g_s$  na área 1 se refletiram em menor taxa transpiratória. A diminuição na transpiração, sobretudo quando não há déficit de água no solo, pode limitar a ocorrência de determinados processos fisiológicos, como por exemplo a absorção e distribuição de nutrientes minerais e a manutenção da temperatura foliar, fatores que contribuem para o comprometimento do crescimento e desenvolvimento vegetal (Elli et al., 2013).

Em adição às alterações  $g_s$ , é possível que a proximidade com fontes de poluição atmosférica também tenha comprometido a fotossíntese devido a fatores não estomáticos. Essa hipótese é corroborada pela menor razão  $A/C_i$  nas plantas da área 1, a qual representa a eficiência de carboxilação da enzima Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO) (Nascimento, 2009). De fato, já foi demonstrado que diferentes poluentes atmosféricos, como o ozônio e o dióxido de enxofre, diminuem o conteúdo de RuBisCO nas folhas, provavelmente como consequência do aumento na produção de EROs (Muneer et al., 2014; Choquette et al., 2020). O aumento na produção de EROs é frequente em plantas expostas a poluentes atmosféricos, uma vez que o fechamento estomático limita o ciclo de Calvin o que, por sua vez, resulta em um excesso de energia fotoquímica que, se não dissipada adequadamente, pode ser transferida para o oxigênio, originando as EROs (Shahid, et al., 2014, Wijewardana et al., 2018). O excesso de EROs desencadeia uma reação em cadeia que oxida proteínas, inibe enzimas e ácidos nucleicos e, conseqüentemente, resulta em danos aos componentes celulares e rompimento de membranas, causando desequilíbrios na homeostase de moléculas-chave. A enzima RuBisCO é particularmente sensível a este processo e o comprometimento da sua atividade reduz a capacidade de fixação de  $CO_2$  das plantas (Heath, 1994, Musselman, 2006).

As menores concentrações de antocianinas e flavonoides nas plantas localizadas às margens da rodovia provavelmente são reflexo da queda na taxa fotossintética, uma vez que a menor disponibilidade de carboidratos altera os padrões de alocação de carbono, com frequente redução na síntese de metabólitos secundários (Stamp et al., 2003, Deng et al., 2019). Sabe-se, ainda, que a biossíntese de flavonoides é muito influenciada pelo status de nitrogênio da planta (Deng et al., 2019). Em nosso estudo, maiores valores do índice de balanço de nitrogênio foram observados na área 1 em comparação com a área 2 e, conforme já foi abordado por Liu et al., (2010), o alto teor de nitrogênio favorece o direcionamento de carboidratos para o metabolismo central, inibindo o acúmulo de flavonoides nas plantas.

O maior índice de balanço de nitrogênio observado com as plantas na área 1 pode ser correlacionado com a maior proximidade com o tráfego de veículos, já que óxidos de nitrogênio ( $NO$ ,  $NO_2$  e  $NO_x$ ) estão entre os principais poluentes liberados pela queima de combustíveis fósseis (Baldasano et al., 2020). A liberação desses compostos tem efeitos danosos em ecossistemas adjacentes, incluindo mudanças na composição das comunidades vegetais e redução de espécies sensíveis aos óxidos de nitrogênio, com

consequente redução na diversidade vegetal, além do comprometimento do crescimento das plantas (Honour et al., 2009). Cabe ressaltar, ainda, que a o excesso de inputs de nitrogênio em ecossistemas naturais pode provocar desequilíbrio de nutrientes e inibir a capacidade fotossintética, ameaçando o crescimento vegetal (Mao et al., 2018).

Espécies cultivadas próximas de emissões de poluição veiculares frequentemente estão sujeitas a uma série de alterações que culminam com maior produção e acúmulo de EROs, causando peroxidação lipídica e degradação de membranas (Kumar et al., 2022). A maior concentração de malonaldeído (MDA) nas plantas da área 1 é um importante marcador de peroxidação lipídica, sendo muito utilizado no monitoramento da poluição veicular (Maki, 2013). Esse aumento é um indício de um estresse oxidativo das células com comprometimento da integridade de membranas celulares (Conrad et al., 2018, Jan et al., 2020). Plantas expostas ao estresse oxidativo frequentemente respondem por meio da ativação da maquinaria antioxidante, o que inclui a atividade das enzimas SOD, CAT, APX e outras peroxidases, que são consideradas enzimas catalisadoras das EROs produzidas nos diferentes compartimentos celulares. A SOD é a primeira enzima na linha de defesa contra o estresse oxidativo, e atua promovendo a dismutação do ânion superóxido ( $O_2^-$ ) em peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ). A partir de então, outras enzimas, como as CAT e APX, atuam na neutralização do  $H_2O_2$  (Brito et al., 2019; Hasanuzzaman et al., 2020). Em nosso estudo a atividade da enzima SOD não foi ativada nas diferentes áreas e entre as espécies estudadas. Moraes et al. (2002) relatou que em situações de estresse oxidativo extremo, o ácido ascórbico e a SOD também não são acionados em plantas expostas a poluição de enxofre, fluoreto e material particulado em espécies *Psidium guajava*. Essa incapacidade para ativar o sistema antioxidante pode ser, inclusive, um dos responsáveis pelo aumento na concentração de MDA nas plantas localizadas na borda do fragmento. Já para a enzima APX, maior atividade foi observada no interior do fragmento. É possível que as plantas na borda do fragmento tenham tido sua atividade enzimática comprometida pelo excesso de elementos tóxicos.

Os efeitos danosos relacionados à proximidade com a borda do fragmento afetaram a densidade das espécies, a qual foi menor na área 1 em comparação com a área 2. Os efeitos dos gases atmosféricos podem ocasionar o desaparecimento de espécies sensíveis, afetando assim a diversidade de espécies em vários níveis de organização e consequentemente reduzindo capacidade de regeneração do ecossistema ao seu formato original (De Faria et al., 2007). Estudos com a mitigação do impacto da poluição do ar na

proximidade de rodovias observaram que a heterogeneidade das espécies e as condições ambientais dos ecossistemas são menores em áreas agrícolas (Manes et al., 2012, Manes., 2016), enfatizando o risco que a fragmentação e a antropização representam para a biodiversidade vegetal.

## **6. Conclusões**

Diversas plantas têm sido sugeridas como importantes biomonitoras para a qualidade do ar em áreas de tráfego de veículos, embora praticamente não existam informações sobre espécies tropicais (Uka et al., 2021). Todas as três espécies estudadas neste trabalho apresentaram alterações fisiológicas entre a área 1 (bordadura – mais próxima das atividades antrópicas), e a área 2 (centro do fragmento – mais distante das fontes de poluição). No entanto, quando as espécies foram analisadas em conjunto, foi possível constatar respostas mais conspícuas do que quando as espécies foram analisadas isoladamente, demonstrando que o emprego de múltiplas espécies vegetais tem potencial para tornar o biomonitoramento mais abrangente e eficaz. Para além da possibilidade de utilizar essas espécies para o biomonitoramento, os resultados aqui obtidos também demonstram o risco da fragmentação de habitats e da antropização para a conservação da biodiversidade do Cerrado. De fato, a proximidade com a rodovia diminuiu a taxa fotossintética das plantas, alterou padrões nutricionais e aumentou a ocorrência de danos celulares, fatores que comprometem o crescimento e a sobrevivência das espécies vegetais, com consequências danosas para a densidade de espécies, o que pode se refletir em perda de biodiversidade e homogeneização do Cerrado.

## 7. Referências

- ABU-SHAHBA, M. S.; MANSOUR, M. M.; MOHAMED, H. I.; SOFY, M. R. (2022) **Effect of biosorptive removal of cadmium ions from hydroponic solution containing indigenous garlic peel and mercerized garlic peel on lettuce productivity.** *Scientia Horticulturae*: v. 293, p. 1-14. doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110727.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, (2016). **Emissões de CO<sub>2</sub> da combustão de combustíveis por setor em 2014, em Emissões de CO<sub>2</sub> da Combustão de Combustíveis, IEA, 2016.** *Em Destaques de CO<sub>2</sub> 2016* - tabelas Excel.
- AIKES, M. A. et al. **Avaliação de metais em material particulado MP10 na fronteira Brasil-Paraguai (Ponte da Amizade).** 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- ASSIS, T. O.; ESCADA, M. I. S.; AMARAL, S. (2021). **Effects of Deforestation over the Cerrado Landscape: A Study in the Bahia Frontier.** *MDPI-Land*: v. 10(4), p. 352. doi.org/10.3390/land10040352
- BALDASANO, J. M. (2020). **COVID-19 lockdown effects on air quality by NO<sub>2</sub> in the cities of Barcelona and Madrid (Spain).** *Science of The Total Environment*: v. 741, 1-10. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140353
- BARBAS, B., DE LA TORRE, A., SANZ, P., NAVARRO, I., ARTIÑANO, B., & MARTÍNEZ, M. A. (2018). **Gas/particle partitioning and particle size distribution of PCDD/Fs and PCBs in urban ambient air.** *Science of the total environment*: v. 624, p. 170-179. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.114
- BASTOS, E. A.; NASCIMENTO, S. P.; SILVA, E. M.; FILHO, F. R. F.; GOMIDE, R. L. (2011). **Identification of cowpea genotypes for drought tolerance.** *Revista Ciência Agronômica*: v. 42(1), p. 100-107. doi.org/10.1590/S1806-66902011000100013
- BAUMBACH, G. (2012). **Air quality control: Origin and Sources of Air Pollution.** *Springer Berlin, Heidelberg*: v. 1(1), p. 15-78. doi.org/10.1007/978-3-642-79001-0
- BILGER, W.; BJÖRKMAN, O. (1990). **Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*.** *Photosynthesis research*: v. 25(3), p. 173-185.

doi.org/10.1007/BF00033159

- BRITO, L.; SILVA, P. A.; FLUMINHAN, A. (2019). **Alterações foliares sugerem efeitos da poluição veicular em plantas da família myrtaceae em áreas urbanas.** *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*: v. 10(1), p. 223-231. doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.001.0018
- CAKMAK, I.; HORST, W. J. (1991). **Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*).** *Physiologia plantarum*: v. 83(3), p. 463-468. doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121.x
- CASTRO, L. N. (2010). **Avaliação ecofisiológica do impacto causado pelo aerossol marinho e pela deposição de ferro particulado em *Eugenia uniflora* L.(Myrtaceae).** *Dissertação*. Mestrado em Fisiologia Vegetal – Universidade Federal de Viçosa: v. 1, p. 1-79. <https://locus.ufv.br/handle/123456789/7080>
- CHOQUETTE, N. E.; AINSWORTH, E. A.; BEZODIS, W.; CAVANAGH, A. P. (2020). **Ozone tolerant maize hybrids maintain Rubisco content and activity during long-term exposure in the field.** *Plant Cell Environ*: v. 43(12), p. 3033-3047. doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121.x
- CONRAD, M.; KAGAN, V. E.; BAYIR, H.; PAGNUSSAT, G. C.; HEAD, B.; TRABER, M. G.; STOCKWELL, B. R. (2018). **Regulation of lipid peroxidation and ferroptosis in diverse species.** *Genes & development*: v. 32(9-10), p. 602-619. doi.org/10.1101/gad.314674.118
- DE FARIA, K. M. S.; DE CASTRO, S. S. (2007). **Uso da terra e sua relação com os remanescentes de cerrado na alta bacia do rio Araguaia (GO, MT e MS).** *Geografia*: v. 32(3), p. 657-668.
- DENG, B.; LI, Y.; XU, D.; YE, Q.; LIU, G. (2019). **Nitrogen availability alters flavonoid accumulation in *Cyclocarya paliurus* via the effects on the internal carbon/nitrogen balance.** *Scientific Reports*: v. 9, p. 1-9. doi.org/10.1038/s41598-019-38837-8
- ELLI, E. F.; CANTARELLI, E. B.; CARON, B. O.; MONTEIRO, G. C.; PAVAN, M. A.; PEDRASSANI, M.; ELOY, E. (2013). **Osmocote[R] no desenvolvimento e comportamento fisiológico de mudas de pitangueira.** *Comunicata Scientiae*: v. 4(4), p. 378-384. doi.org/10.14295/cs.v4i4.257
- FOYER, C. H.; SHIGEOKA, S. (2011). **Understanding Oxidative Stress and Antioxidant Functions to Enhance Photosynthesis.** *Plant Physiology*: v. 155(1),

- p. 93-100. doi.org/10.1104/pp.110.166181
- FUSARO, L.; PALMA, A.; SALVATORI, E.; BASILE, A.; MARESCA, V.; ASADI KARAM, E.; MANES, F. (2017). **Functional indicators of response mechanisms to nitrogen deposition, ozone, and their interaction in two Mediterranean tree species.** *PloS one*: v. 12(10), p. 1-20. doi.org/10.1371/journal.pone.0185836
- GENTY, B.; BRIANTAIS, J. M.; BAKER, N. R. (1989). **The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence.** *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*: v. 990(1), p. 87-92. doi.org/10.1016/S0304 4165(89)80016-9.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. (1977). **Superoxide dismutases: Occurrence in higher Plants.** *Plant Physiology*: v. 59, p. 309-314.
- GIL, B. V. (2019). **Respostas morfofisiológicas de mudas de *Eugenia uniflora* em condições de sombreamento.** *Dissertação*. Mestrado em Agronomia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná: v. 1, p. 1-56.
- GOULAS, Y.; CEROVIC, Z. G.; CARTELAT, A.; MOYA, I. (2004). **Dualex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence.** *Applied Optics*: v. 43, p. 4488-4496. doi.org/10.1364/AO.43.004488
- HAO, L.; YIN, H.; WANG, J.; WANG, X.; GE, Y. (2021). **Potential of big data approach for remote sensing of vehicle exhaust emissions.** *Scientific Reports*: v. 11(1), p. 1-10. doi.org/10.1038/s41598-021-84890-7
- HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M. H. M. B.; ZULFIQAR, F.; RAZA, A.; MOHSIN, S. M.; MAHMUD, J. A.; FUJITA, M.; FOTOPOULOS, V. (2020). **Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator.** *Antioxidants*: v. 9(8), p. 681. doi.org/10.3390/antiox9080681
- HEATH, R. L. (1994). **Possible mechanisms for the inhibition of photosynthesis by ozone.** *Photosynthesis Research*: v. 39(3), p. 439-451. doi.org/10.1007/BF00014597
- HONOUR, S. L.; BELL, J. N. B.; ASHENDEN, T. W.; CAPE, J. N.; POWER, S. A. (2009). **Responses of herbaceous plants to urban air pollution: Effects on growth, phenology and leaf surface characteristics.** *Environmental Pollution*: v. 157(4), p. 1279-1286. doi.org/10.1016/j.envpol.2008.11.049
- HOSHIKA, Y.; FARES, S.; PELLEGRINI, E.; CONTE, A.; PAOLETTI, E. (2020).

- Water use strategy affects avoidance of ozone stress by stomatal closure in Mediterranean trees – a modelling analysis.** *Plant, Cell & Environment*: 43(3), p. 611-623. doi.org/10.1111/pce.13700
- JAN, S.; NOMAN, A.; KAYA, C.; ASHRAF, M.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. (2020). **24-Epibrassinolide Alleviates the Injurious Effects of Cr(VI) Toxicity in Tomato Plants: Insights into Growth, Physio-Biochemical Attributes, Antioxidant Activity and Regulation of Ascorbate–Glutathione and Glyoxalase Cycles.** *Journal of Plant Growth Regulation*: v. 39, p. 1587-1604. doi.org/10.1007/s00344-020-10169-2
- KUMAR, A.; SINGH, H.; KUMARI, G.; BISHT, S.; MALIK, A.; KUMAR, N.; SINGH, M.; RATURI, A.; BARTHWAL, S.; THAKUR, A.; KAUSHAL, R. (2022). **Adaptive resilience of roadside trees to vehicular emissions via leaf enzymatic, physiological, and anatomical trait modulations.** *Environmental Pollution*: v. 313, p. 1-10. doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120191
- LI, Y.; NING, Z.; LEE, C. F. F.; YAN, J.; LEE, T. H. (2018). **Effect of acetone-butanol-ethanol (ABE)–gasoline blends on regulated and unregulated emissions in spark-ignition engine.** *Energy*: v. 118 (5), p. 1157-1167. doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.022
- LIU, H. J.; ZHAO, L. C.; FANG, S. B.; LIU, S. W.; HU, J. S.; WANG, L.; LIU, X. D.; WU, Q. F. (2016). **Use of the lichen *Xanthoria mandschurica* in monitoring atmospheric elemental deposition in the Taihang Mountains, Hebei, China.** *Scientific Reports*: v. 6, p. 1-9. doi.org/10.1038/srep23456
- LIU, W.; ZHU, D. W.; LIU, D. H.; GENG, M. J.; HAMILTON, D. P. (2010). **Influence of nitrogen on the primary and secondary metabolism and synthesis of flavonoids in *Chrysanthemum morifolium* Ramat.** *Journal of Plant Nutrition*: v. 33(2), p. 240-254. Doi:10.1080/01904160903434287
- MAKI, E. S.; SHITSUKA, R.; BARROQUEIRO, C. H.; SHITSUKA, D. M. (2013). **Utilização de Bioindicadores em monitoramento de poluição.** *Biota Amazônia*: v. 3(2), p. 169-178.
- MANES, F.; INCERTI, G.; SALVATORI, E.; VITALE, M.; RICOTA, C.; CONSTANZA, R. (2012). **Urban ecosystem services: tree diversity and stability of tropospheric ozone removal.** *Ecological Applications*: v. 22(1), p. 349-360. doi.org/10.1890/11-0561
- MANES, F.; MARANDO, F.; CAPOTORTI, G.; BLASI, C.; SALVATORI, E.;

- FUSARO, L.; CIANCARELLA, L.; MIRCEA, M.; MARCHETTI, M.; CHIRICI, G.; MUNAFÒ, M. (2016). **Regulating Ecosystem Services of forests in ten Italian Metropolitan Cities: Air quality improvement by PM10 and O<sub>3</sub> removal.** *Ecological Indicators*: v. 67, p. 425-440. doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.009
- MAO, Q.; LU, X.; MO, H.; GUNDERSEN, P.; MO, J. (2018). **Effects of simulated N deposition on foliar nutrient status, N metabolism and photosynthetic capacity of three dominant understory plant species in a mature tropical forest.** *Science of the Total Environment*: v. 610-611, p. 555-562. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.087
- MESQUITA, G. L.; MACHADO, E. C.; MACHADO, R.; CANTARELLA, H.; MATTOS JR., D. (2013). **Fluoride Exposure Compromises Gas Exchange of Plants.** *American Journal of Plant Sciences*: v. 4(12C), p. 16-20. DOI:10.4236/ajps.2013.412A3003
- MIR, S. A.; BHAT, J. I. A.; LONE, F.; REHMAN, M. U.; NAZIR, N.; LONE, A. A.; ALI, T.; JEHANGIR, A. (2021). **Synergistic effects of vehicular emissions (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and SPM) on progression of *Crocus sativus* L. in Saffron bowl Kashmir.** *ELSEVIER Environmental Advances*: v. 3, p. 1-9. doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100033
- MISHRA, S.; BHARAGAVA, R. N. (2016). **Toxic and genotoxic effects of hexavalent chromium in environment and its bioremediation strategies.** *Journal of Environmental Science and Health*: v. 34(1), p. 1-32. Doi:10.1080/10590501.2015.1096883
- MORAES, R. M.; KLUMPP, A.; FURLAN, C. M.; KLUMPP, G.; DOMINGOS, M.; RINALDI, M. C. S.; MODESTO, I. F. (2002). **Tropical fruit trees as bioindicators of industrial air pollution in southeast Brazil.** *Environment International*: v. 28(5), p. 367-374. doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00060-0
- MUKHERJEE, S.; CHAKRABORTY, A.; MONDAL, S.; SAHA, S.; HAQUE, A.; PAUL, S. (2019). **Assessment of common plant parameters as biomarkers of air pollution.** *Environ Monit Assess*: v. 191(400). doi.org/10.1007/s10661-019-7540-y
- MUNEER, S.; KIM, T. H.; CHOI, B. C.; LEE, B. S.; LEE, J. H. (2014). **Effect of CO, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> on ROS production, photosynthesis and ascorbate–glutathione pathway to induce *Fragaria annasa* as a hyperaccumulator.** *Redox Biology*: v.

- 2, p. 91–98. doi.org/10.1016/j.redox.2013.12.006
- MUSSELMAN, R. C.; LEFOHN, A. S.; MASSMAN, W. J.; HEATH, R. L. (2006). **A critical review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects.** *Atmospheric Environment*: v. 40(10), p. 1869-1888. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.064
- NASCIMENTO, S. P. (2009). **Efeito do déficit hídrico em feijão caupi para identificação de genótipos com tolerância à seca.** Dissertação. (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal do Piauí, Teresina
- NUNES, M. V.; MENEZES, A. S.; CARVALHO, A. G. (2009). **A auto-imagem do MST na “Revista Sem Terra”: a guerra simbólica através da mídia.** *Intercom* – Sociedade Brasileira de Estudos Interdisciplinares da Comunicação, XXXII Congresso Brasileiro de Ciências da Comunicação – Curitiba: p. 1-16.
- PACHECO, F. V.; LAZZARINI, L. E. S.; ALVARENGA, I. C. (2021). **Metabolismo relacionado com a fisiologia dos estômatos.** *Enciclopédia Biosfera*: v. 18(36), p. 186-206.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. (2014). **Mudanças Climáticas 2014: Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.** *Equipe de Redação Central: RK Pachauri e LA Meyer* (eds.), IPCC, Genebra, Suíça.
- PATEL, M; PARIDA, A; (2021). **Salinity alleviates the arsenic toxicity in the facultative halophyte *Salvadora persica* L. by the modulations of physiological, biochemical, and ROS scavenging attributes.** *Journal of Hazardous Materials*: v. 40. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123368
- PEIXOTO, P. H. P.; CAMBRAIA, J.; SANT’ANA, R.; MOSQUIM, P. R.; MOREIRA, M. A. (1999). **Aluminum effects on lipid peroxidation and on activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum.** *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*: v. 11, p. 137-143.
- PEREIRA, S. S. F. C. (2009). **Os desafios da adaptação local às alterações climáticas.** Dissertação - MESTRADO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS DO AMBIENTE - UNIVERSIDADE DE LISBOA FACULDADE DE CIÊNCIAS: v. 1, p. 1-242.
- RAGGI, F. A. S. (2020). **Uso de *Oeceoclades maculata* (Lindley) Lindley como Bioindicadora de Metais Pesados no Ar Atmosférico da Cidade de Volta Redonda, RJ.** Dissertação - Mestrado em Tecnologia Ambiental – Universidade

*Federal Fluminense*: v. 1, p. 1-80.

- RAI, P. K. (2016). **Impacts of particulate matter pollution on plants. Implications for environmental biomonitoring**: v. 129, p. 120-136. doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.012
- RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C.; SANTOS, M. G.; OLIVEIRA, R. F. (2009). **Seasonal and diurnal changes in photosynthetic limitation of young sweet orange trees. Environmental and Experimental Botany**: v. 66(2), p. 203-211. doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.03.011
- RODRIGUES, A. A.; VASCONCELOS-FILHO, S. C.; MENDES, G. C.; REHN, L. S.; RODRIGUES, D. A.; RODRIGUES, C. L.; MÜLLER, C. (2017). **Fluoride in simulated rain affects the morphoanatomy and physiology of *Eugenia dysenterica* (Mart.) DC.** *Ecological Indicators*: v. 82, p. 189-195. doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.005
- RODRIGUES, D. A.; FILHO, S. C. V.; RODRIGUES, A. A.; MÜLLER, C.; FARNESE, F. S.; COSTA, A. C.; TELES, E. M. G.; RODRIGUES, C. L. (2018). ***Byrsonima basiloba* as a bioindicator of simulated air pollutants: Morphoanatomical and physiological changes in response to potassium fluoride.** *Ecological Indicators*: v. 89, p. 301-308. doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.019.
- SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO, A.F.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, J.; BOLFE, E. L. (2019). **Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation.** *Journal of Environmental Management*: v. 232, p. 818–828. doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108
- SHAHID, M.; POURRUT, B.; DUMAT, C.; NADEEM, M.; ASLAM, M.; PINELLI, E. (2014). **Heavy-Metal-Induced Reactive Oxygen Species: Phytotoxicity and Physicochemical Changes in Plants. In: Whitacre, D. (eds). Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**: v. 232 , p. 1-44. doi.org/10.1007/978-3-319-06746-9\_1
- SILVA, S. L. R.; COSTA, A. C.; PEDROSO, A. N. V.; BATISTA, P. F.; CRISPIM-FILHO, A. J.; ALMEIDA, G. M.; NASCIMENTO, K. J. T.; FERREIRA, L. L.; DOMINGOS, M.; SILVA, A. A. (2022). **Morphophysiological indicators of the glyphosate action on Brazilian savanna plants: a multivariate analysis.** *Acta Physiologiae Plantarum*: v. 44(7), p. 1-16. Doi:10.1007/s11738-022-03409-3

- STAMP, N. (2003). **Out of the Quagmire of Plant Defense Hypotheses.** *The Quarterly Review of Biology*: v. 78(1), p. 23-55. doi.org/10.1086/367580
- STRASSBURG, B. B. N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A. E.; OLIVEIRA FILHO, F. J. B.; DE SCARAMUZZA, C. A. M.; SCARANO, F. R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. (2017). **Moment of truth for the Cerrado hotspot.** *Nature Ecology & Evolution*: v. 1(0099). doi: 10.1038/s41559-017-0099
- TOVAR-SÁNCHEZ, E.; HERNÁNDEZ-PLATA, I.; MARTÍNEZ, M. S.; VALENCIA-CUEVAS, L.; GALANTE, P. M. (2018). **Heavy metal pollution as a biodiversity threat.** *Heavy Metals*: v. 383. doi.org/10.5772/intechopen.74052
- UKA, U. N.; BELFORD, E. J. D.; ELEBE, F. A. (2021). **Effects of road traffic on photosynthetic pigments and heavy metal accumulation in tree species of Kumasi Metropolis, Ghana.** *SN Applied Sciences*: v. 3(131), p. 1-12. doi.org/10.1007/s42452-020-04027-9
- WIJEWARDANA, C.; REDDY, K. R.; ALSAJRI, F. A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, J.; GOLDEN, B. (2018). **Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns.** *Irrigation Science*: v. 36, p. 241-255. doi.org/10.1007/s00271-018-0580-1
- YADAV, R.; SAHU, L. K.; TRIPATHI, N.; PAL, D.; BEIG, G.; JAAFFREY, S. N. A. (2019). **Investigation of emission characteristics of NMVOCs over urban site of western India.** *Environmental Pollution*: v. 252(A), p. 245-255. doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.089