



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA GOIANO – IF GOIANO -
CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGROQUÍMICA

**Impacto do Glifosato em Abelhas Nativas *Tetragonisca angustula*:
Ecotoxicidade e Consequências de Exposição Tópica e Residual para Polinizadores**

Autora: Adriana Bernardes de Jesus

Orientador: Dr. Althiéris de Souza Saraiva

Coorientadora: Dra. Suzana Maria Loures de Oliveira Marcionílio

RIO VERDE – GO

Agosto – 2024



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA GOIANO – IF GOIANO -
CAMPUS RIO VERDE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGROQUÍMICA

**Impacto do Glifosato em Abelhas Nativas *Tetragonisca angustula*:
Ecotoxicidade e Consequências de Exposição Tópica e Residual para Polinizadores**

Autora: Adriana Bernardes de Jesus

Orientador: Dr. Althiéris de Souza Saraiva

Coorientadora: Dra. Suzana Maria Loures de Oliveira Marcionílio

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM AGROQUÍMICA, ao Programa de Pós-Graduação em Agroquímica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração: Agroquímica Ambiental.

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

Jesus, Adriana Bernardes de
J58i Impacto do glifosato em abelhas nativas
tetragonisca angustula: ecotoxicidade e consequências
de exposição tópica e residual para polinizadores /
Adriana Bernardes de Jesus ; orientador Althiéris de
Souza Saraiva. -- Rio Verde, 2024.
64 f.

Dissertação (Mestrado em Agroquímica) -- Instituto
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

1. Ecotoxicologia. 2. Herbicidas. 3. Efeito Agudo.
4. Efeito Crônico. 5. Abelhas sem ferrão. I. Saraiva, Althiéris de
Souza, orient. II. 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:

Adriana Bernardes de Jesus

Matrícula:

2022102310340012

Título do trabalho:

Impacto do Glifosato em Abelhas Nativas *Tetragonisca angustula*:

Ecotoxicidade e Consequências de Exposição Tópica e Residual para Polinizadores

RESTRICÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

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

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 inclusos 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 - Goiás

02 / 10 / 2024

Documento assinado digitalmente
gov.br
ADRIANA BERNARDES DE JESUS
Data: 02/10/2024 12:45:01-0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>

Local

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente
gov.br
ALTHEIRIS DE SOUZA SARANA
Data: 02/10/2024 13:18:15-0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>



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

Declaração nº 119/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA Nº/ 113

BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos dois dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e quatro, às 10h00 (dez horas), reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: Prof. Dr. Althiéris de Souza Saraiva (orientador), Profa. Dra. Andreia do Carmo Martins Rodrigues (avaliadora externa) e Prof. Dr. Fernando Henrique Antonioli Farache (avaliador externo), sob a presidência do primeiro, em sessão realizada online via google meet, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, da autoria **ADRIANA BERNARDES DE JESUS**, discente do Programa de Pós-Graduação em Agroquímica do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Althiéris de Souza Saraiva, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida à autora da Dissertação 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 procedida às correções recomendadas, a Dissertação foi **APROVADA**, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM AGROQUÍMICA**, na área de concentração 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 de circulação nacional e/ou internacional, 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, eu, Pâmella Trayci da Silva Gonçalves, secretária do PPGAq, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora em quatro vias de igual teor.

Prof. Dr. Althiéris de Souza Saraiva (Presidente)

Profa. Dra. Andreia do Carmo Martins Rodrigues (Avaliadora externa)

Prof. Dr. Fernando Henrique Antonioli Farache (Avaliador externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- Andreia do Carmo Martins Rodrigues, Andreia do Carmo Martins Rodrigues - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano (1), em 02/08/2024 12:36:32.
- Fernando Henrique Antonioli Farache, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/08/2024 12:30:41.
- Althieris de Souza Saraiva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/08/2024 12:29:51.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/08/2024. 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: 619249
Código de Autenticação: c81c533ba1



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

RIO VERDE – GO**Agosto – 2024****DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus filhos, Elizabeth Bernardes e Luke Bernardes, meus maiores incentivadores, a força que me impulsiona a seguir em frente e nunca desistir.

Ao meu pai, Raulino Bernardes (*in memoriam*) que sempre dizia que conhecimento é a única coisa que ninguém poderia me furtar.

À minha mãe Maria de Fátima de Jesus (*in memoriam*), que foi exemplo de força, garra e coragem.

Às minhas tias que me criaram como mães, Luzia Bernardes, Vera Lúcia Bernardes e Egleh Guimarães, minhas heroínas, que me acolheram com carinho e dedicação.

Aos meus familiares que sempre foram minha rede de apoio.

À minha coorientadora Dra. Suzana Maria Loures, que me atendeu dentro de suas limitações, incentivou a entrar no mestrado e apresentou-me ao meu orientador, o que tornou tudo isso possível.

Ao meu orientador, Dr. Althiéris Saraiva, que me guiou com sabedoria e paciência durante todo o processo de elaboração deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para o meu crescimento profissional e acadêmico.

DEDICO.

“Há vida em outros mundos? Não sabemos. Até agora, não encontramos nenhuma evidência convincente. Mas se houver, elas serão muito distantes e inóspitas. A Terra é o único mundo que conhecemos que pode sustentar a vida. É nosso lar. Vamos tratá-la com gentileza.”

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus queridos filhos, Elizabeth Bernardes e Luke Bernardes, por serem pacientes em momentos que precisei dedicar à pesquisa.

Ao meu orientador Althiéris Saraiva, por sua dedicação constante a tudo o que se propõe, pela riqueza de conhecimentos, pelo atendimento sempre pontual e sua assertividade e compreensão.

Ao grupo de Conservação em Agroecossistemas e Ecotoxicologia – CAE, por oportunizar a experiência de troca com profissionais da área e, também minha carreira.

A Diretoria de Pós-graduação, Pesquisa e Inovação do IF Goiano – Campus Rio Verde, pela inestimável alocação de recursos essenciais, que foram fundamentais para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao Núcleo de Ciência, Arte e Cultura do IF Goiano (NAIF), sob coordenação da professora Ma. Aline Ditomaso, por servir de base de apoio para a realização de experimentos quando foi necessário.

Ao laboratório de Águas e Efluentes sob coordenação da professora Dra. Suzana Maria Loures, que cedeu espaço para o, período de minha pesquisa.

Ao laboratório de Poluição do Solo, sob coordenação do professor Dr. Rafael Leal, que abriu as portas para que fosse possível o prosseguimento da minha pesquisa, sem este espaço nada disso seria possível.

À empresa UPL do Brasil Indústria e Comércio de Insumos Agropecuários S.A, pelo fornecimento de insumos utilizados nos ensaios experimentais.

Aos profissionais que foram parte de minhas bancas de seminário e qualificação, Dr. Fernando Farache, Dr. Salmon Landi, Dr. Rafael Leal e Dra. Andreia Rodrigues, por contribuírem imensamente com o desenvolvimento da minha pesquisa e escrita.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde e ao Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, bem como ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Campos Belos, pela parceria.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP).

BIOGRAFIA DA AUTORA

Nasceu em Rio Verde – Goiás, formou-se em Licenciatura em Química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, e fez parte do Núcleo de Ciência, Arte e Cultura do IF Goiano (NAIF), como voluntária e como bolsista de extensão, desenvolvendo projetos que integraram a arte, educação e ciência. Possui pós-graduação *lato sensu* em Química Ambiental pela EAD Uniminas Ltda. Foi bolsista do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (Pibid), e aperfeiçoou as habilidades como discente de licenciatura. Foi também bolsista do programa de Residência Pedagógica, aperfeiçoando as habilidades em sala de aula.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| RESUMO GERAL | 16 |
| GENERAL ABSTRACT | 17 |
| 1- INTRODUÇÃO GERAL | 18 |
| 2 - OBJETIVOS | 22 |
| 2.1 – Objetivo Geral | 22 |
| 2.2 – Objetivos Específicos | 22 |
| 3- CAPÍTULO 1 - REVISÃO DE LITERATURA | 23 |
| Abelhas Nativas como Bioindicadoras de Poluição Ambiental por Glifosato | 23 |
| RESUMO | 23 |
| ABSTRACT | 24 |
| 3.1 - Uso de Herbicidas na Agricultura a Nível Mundial e no Brasil | 25 |
| 3.2 - Abelhas nativas como bioindicadores de contaminação ambiental com ênfase nos efeitos do Glifosato em seu organismo | 29 |
| 3.3 – <i>Tetragonisca angustula</i> como potenciais bioindicadoras de contaminação ambiental | 34 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 36 |
| 4 - CAPÍTULO II | 45 |
| RESUMO | 45 |
| ABSTRACT | 47 |
| 4.1 - Introdução | 47 |
| 4.2 - Material e métodos | 48 |
| 4.2. 1 - Manutenção de <i>T. angustula</i> | 48 |
| 4.2.2 - Aquisição dos Herbicidas | 48 |
| 4.2.3 - Ensaio para determinação da CL ₁₀ e CL ₅₀ sobre <i>T. angustula</i> | 49 |
| 4.2.4 - Teste de preferência alimentar | 50 |
| 5 - Resultados | 51 |
| 6 - Discussão | 60 |
| 7 - Conclusão | 66 |
| 8 - Referências Bibliográficas | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1** - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tópico(a) e residual(b) expostas em período de 48 horas a concentrações de Padrão Analítico de Glifosato..... 49.
- Figura 2** - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tópico(a) e residual(b) expostas em período de 48 horas ao produto Glyphotal TR[®] 49.
- Figura 3** - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tópico(a) e residual(b) expostas em período de 48 horas ao produto Pilarsato[®] 50.
- Figura 4** - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tópico(a) e residual(b) expostas em período de 48 horas ao produto Pocco[®] 50.
- Figura 5** - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tópico(a) e residual(b) expostas em período de 48 horas ao produto Templo[®]51.
- Figura 6** - Ecotoxicidade de Glifosato P.A. (a), Glyphotal TR[®] (b), Pilarsato[®] (c), Pocco[®] (d), e Templo[®] (e) sobre a preferência alimentar de *T. angustula* após 24h de exposição53.

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do Glifosato..... | 24. |
| Tabela 2 – Concentrações ambientalmente relevantes de Glifosato..... | 27. |
| Tabela 3 – Concentrações de Glifosato que causam efeitos em abelhas | 28. |
| Tabela 4 - Valores de CL_{10} e CL_{50} para Toxicidade Aguda de Glifosato P.A. e Herbicidas Comerciais em <i>T. angustula</i> | 51. |

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

2,4-D: Ácido 2,4-Diclorofenoxiacético

ANS: Agência Nacional de Saúde

ARE: Acute Residual Effect

ATE: Acute Topical Effect

EAT: Efeito Agudo Tópico

EAR: Efeito Agudo Residual

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEO: Concentração de Efeito Observado

CENO: Concentração de Efeito Não Observado

CL₁₀: Concentração Letal para 10%

CL_{10-48h}: Concentração Letal para 10% em 48 horas

CL₅₀: Concentração Letal para 50%

CL_{50-48h}: Concentração Letal para 50% em 48 horas

CONSEA: Conselho Nacional de Segurança Alimentar

DL_{10-48h}: Lethal Dose for 10% in 48 hours

DL_{50-48h}: Lethal Dose for 50% in 48 hours

Dra: Doutora

Dr: Doutor

EPSPS: 5-enol-piruvil shiquimato-3-fosfato sintase

FAO/STAT: Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

Fapeg: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás

g/L: Grama por Litro

IARC: Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

i.a.: Ingrediente ativo

K_d: Coeficiente de Distribuição

K_{oc}: Coeficiente de Partição entre o Carbono Orgânico do Solo e a Solução do Solo

K_{ow}: Coeficiente de Partição Octanol-Água

LE: Limo de Extrato

Log K_{ow}: Logaritmo do Coeficiente de Partição Octanol-Água

LOEC: Lowest Observed Effect Concentration (ou CEO em português)

mg/L: Miligrama por Litro

mg a.i./L: Milligrams of Active Ingredient per Liter (em inglês)

mg e.a./L: Miligrama de Equivalente Ativo por Litro

NOEC: No Observed Effect Concentration (Concentração de Efeito Não Observado)

ONU: Organização das Nações Unidas

PET: Polietileno Tereftalato

P.A.: Padrão Analítico

PROAP: Programa de Apoio à Pós-Graduação

Pibid: Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência

®: Marca Registrada

%: Percentual

% e.a.: Percentual de Equivalente Ativo

TON: Tonelada

T. angustula: *Tetragonisca angustula*

µg/bee: Micrograma por Abelha

t^{1/2}: Tempo de Meia-Vida

RESUMO GERAL

DE JESUS, A.B.. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – **Impacto do Glifosato em Abelhas Nativas *Tetragonisca angustula*: Ecotoxicidade e Consequências de Exposição Tópica e Residual para Polinizadores.** 2024. Orientador: Dr. Althiéris de Souza Saraiva. Coorientadora: Dra. Suzana Maria Loures de Oliveira Marcionílio.

Este estudo avaliou o impacto do Glifosato [puro (P.A.) e comercial] na abelha *Tetragonisca angustula*, um organismo essencial para a polinização e buscou entender os efeitos nas abelhas através da exposição a diferentes concentrações do herbicida, com vistas a contribuir para práticas agrícolas mais sustentáveis, num contexto de agroquímica, e a preservação da biodiversidade. Os resultados indicam que o Glifosato apresenta diferentes toxicidades entre as formulações, exigindo pesquisas mais aprofundadas e medidas para minimizar o impacto ambiental. A concentração letal para 10% das abelhas em 48 horas (CL_{10-48h}) e a concentração letal para 50% das abelhas em 48 horas (CL_{50-48h}) variaram entre as formulações testadas. Da mesma forma, a Concentração de Efeito Não Observado (CENO) e a Concentração de Efeito Observado (CEO) também apresentaram variações. Os testes de toxicidade para o Glifosato Puro (P.A.) revelaram que a concentração letal para 10% das abelhas em 48 horas (CL_{10-48h}) foi de 2269,83 mg/L para o Efeito Agudo Residual (EAR), enquanto a concentração letal para 50% das abelhas (CL_{50-48h}) alcançou 58355,90 mg/L. No caso do Efeito Agudo Tópico (EAT), a CL_{10-48h} foi de 15926,80 mg/L, e a CL_{50-48h} foi de 11075,00 mg/L. Para o Glyphotal TR[®], os valores obtidos foram de 644,11 mg e.a./L para a CL_{10-48h} e 4136,94 mg e.a./L para a CL_{50-48h} no EAR. No EAT, a CL_{10-48h} foi de 635,30 mg e.a./L, e a CL_{50-48h} foi de 9801,76 mg e.a./L. No caso do Pocco[®], a CL_{10-48h} para o EAR foi de 715,12 mg e.a./L, com a CL_{50-48h} em 6424,70 mg e.a./L. Para o EAT, os valores foram de 595,53 mg e.a./L para a CL_{10-48h} e 8898,98 mg e.a./L para a CL_{50-48h} . Os resultados para o Pilarsato[®] mostraram uma CL_{10-48h} para o EAR de 945,49 mg e.a./L e uma CL_{50-48h} de 9088,72 mg e.a./L. Já no EAT, a CL_{10-48h} foi de 874,49 mg e.a./L e a CL_{50-48h} foi de 13332,30 mg e.a./L. Para o Templo[®], os valores foram de 3329,97 mg e.a./L para a CL_{10-48h} e 15182,90 mg e.a./L para a CL_{50-48h} no EAR, respectivamente. No EAT, a CL_{10-48h} foi de 3182,27 mg e.a./L, enquanto a CL_{50-48h} foi de 29955,00 mg e.a./L. As CENO no Teste de Preferência Alimentar para os diferentes compostos foram: 500,00 mg/L para o Glifosato P.A., 2000,00 mg e.a./L para o Glyphotal TR[®], 2000,00 mg e.a./L para o Pocco[®], 16000,00 mg e.a./L para o Pilarsato[®] e 4000,00 mg e.a./L para o Templo[®]. Já as CEO no Teste de Preferência Alimentar foram de 1000,00 mg/L para o Glifosato P.A., 4000,00 mg e.a./L para o Glyphotal TR[®], 4000,00 mg e.a./L para o Pocco[®], 32000,00 mg e.a./L para o Pilarsato[®] e 8000,00 mg e.a./L para o Templo[®]. O P.A. mostrou-se menos letal para as abelhas, com o Pilarsato[®] apresentando efeito mais deletério. Além da avaliação da ecotoxicidade de diferentes formulações de Glifosato, o estudo incluiu uma revisão bibliográfica (que antecede o estudo baseado na experimentação) sobre o impacto desse herbicida na saúde das abelhas nativas, com ênfase na espécie *T. angustula*. A revisão aborda como o Glifosato, amplamente utilizado em práticas agrícolas, contamina pólen, néctar e água e os efeitos dessa exposição nas abelhas. Foram discutidas concentrações ambientalmente relevantes e os impactos potenciais, evidenciando alterações comportamentais e fisiológicas nas abelhas. Em suma, este estudo contribuiu significativamente para a ciência agroquímica ao comparar a toxicidade de diversas formulações de Glifosato, incluindo o Glifosato puro e produtos comerciais, sobre a abelha nativa *T. angustula*. Essas informações são essenciais para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e para a proteção de polinizadores, além de informar regulamentações sobre o uso de herbicidas e abrir caminhos para pesquisas futuras sobre os impactos a longo prazo.

Palavras-chave: Ecotoxicologia; Herbicidas; Efeito Agudo; Efeito Crônico; Abelhas sem ferrão.

GENERAL ABSTRACT

DE JESUS, A.B.. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – **Impact of Glyphosate on Native Bees *Tetragonisca angustula*: Ecotoxicity and Consequences of Topical and Residual Exposure for Pollinators.** 2024. Advisor: Dr. Althiéris de Souza Saraiva. Co-advisor: Dr. Suzana Maria Loures de Oliveira Marcionílio.

This study evaluated the impact of Glyphosate [pure (P.A.) and commercial] on the bee *Tetragonisca angustula*, which is an essential organism for pollination, aiming to understand its effects on bees through exposure to different herbicide concentrations, with a view to contributing to more sustainable agricultural practices, in the context of agrochemicals, and the biodiversity preservation. The results indicate that Glyphosate presents different toxicities among the formulations, requiring further research and measures to minimize its environmental impact. The lethal concentration for 10% of bees in 48 hours (DL_{10-48h}) and the lethal concentration for 50% of bees in 48 hours (DL_{50-48h}) varied between the tested formulations. Similarly, the No Observed Effect Concentration (NOEC) and the Observed Effect Concentration (LOEC) also showed variations. Toxicity tests for Pure Glyphosate (P.A.) revealed that the lethal concentration for 10% of bees in 48 hours (DL_{10-48h}) was 2269.83 mg/L for Acute Residual Effect (ARE), while the lethal concentration for 50% of bees (DL_{50-48h}) reached 58355.90 mg/L. For Acute Topical Effect (ATE), the DL_{10-48h} was 15926.80 mg/L, and the DL_{50-48h} was 11075.00 mg/L. For Glyphotal TR[®], the obtained values were 644.11 mg a.i./L for DL_{10-48h} and 4136.94 mg a.i./L for DL_{50-48h} in ARE. In ATE, the DL_{10-48h} was 635.30 mg a.i./L, and the DL_{50-48h} was 9801.76 mg a.i./L. For Pocco[®], the DL_{10-48h} for ARE was 715.12 mg a.i./L, with the DL_{50-48h} at 6424.70 mg a.i./L. For ATE, the values were 595.53 mg a.i./L for DL_{10-48h} and 8898.98 mg a.i./L for DL_{50-48h} . Results for Pilarsato[®] showed an DL_{10-48h} for ARE of 945.49 mg a.i./L and an DL_{50-48h} of 9088.72 mg a.i./L. In ATE, the DL_{10-48h} was 874.49 mg a.i./L, and the DL_{50-48h} was 13332.30 mg a.i./L. For Templo[®], the values were 3329.97 mg a.i./L for DL_{10-48h} and 15182.90 mg a.i./L for DL_{50-48h} in ARE. In ATE, the DL_{10-48h} was 3182.27 mg a.i./L, while the DL_{50-48h} was 29955.00 mg a.i./L. The NOEC in the Food Preference Test for the different compounds were: 500.00 mg/L for Pure Glyphosate, 2000.00 mg a.i./L for Glyphotal TR[®], 2000.00 mg a.i./L for Pocco[®], 16000.00 mg a.i./L for Pilarsato[®], and 4000.00 mg a.i./L for Templo[®]. The LOEC in the Food Preference Test were: 1000.00 mg/L for Pure Glyphosate, 4000.00 mg a.i./L for Glyphotal TR[®], 4000.00 mg a.i./L for Pocco[®], 32000.00 mg a.i./L for Pilarsato[®], and 8000.00 mg a.i./L for Templo[®]. P.A. proved to be less lethal to bees, with Pilarsato[®] showing more deleterious effects. In addition to evaluating the ecotoxicity of different glyphosate formulations, the study included a literature review (preceding the experimental study) about the impact of this herbicide on the health of native bees, with an emphasis on the species *T. angustula*. The review discusses how glyphosate, widely used in agricultural practices, contaminates pollen, nectar, and water, and the effects of this exposure on bees. Environmental concentrations and their potential impacts were discussed, highlighting behavioral and physiological changes in bees. In summary, this study significantly contributes to agrochemical science by comparing the toxicity of various glyphosate formulations, including pure glyphosate and commercial products, on the native bee *T. angustula*. This information is essential for developing more sustainable agricultural practices and protecting pollinators, as well as informing herbicide use regulations and paving the way for future research on long-term impacts.

Keywords: Ecotoxicology; Herbicides; Acute Effect; Chronic Effect; Stingless Bees.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O uso de Agrotóxicos é uma prática comum na agricultura moderna, desempenhando papel importante no controle de insetos-praga, doenças e plantas daninhas. No Brasil, a comercialização desses produtos atinge volumes significativos, refletindo a importância e a dependência da agricultura pelos pesticidas. Em 2022, foram comercializadas 800.652 toneladas de ingredientes ativos (i.a.) classificados como "Químicos e Bioquímicos" (IBAMA, 2024). Entre os produtos mais vendidos estão o Glifosato e seus sais, o 2,4-D e a Atrazina (IBAMA, 2024).

Os herbicidas são amplamente utilizados na agricultura, principalmente para o combate de plantas daninhas (Lopes; Albuquerque, 2018) em áreas agrícolas e urbanas. O uso de fórmulas tradicionais está aumentando, sendo aplicadas de diferentes maneiras ou associadas a características transgênicas (Merotto *et al.*, 2022). O Glifosato (N-fosfometilglicina) é o herbicida mais utilizado em diversos sistemas agrícolas (Merotto *et al.*, 2022). Entre 2009 e 2022, foram comercializadas no Brasil 2,45 milhões de toneladas de Glifosato, com 230,52 mil toneladas apenas em 2022 (IBAMA, 2024). Este herbicida é não seletivo e pós-emergente (Lópes *et al.*, 2018). Originalmente sintetizado em 1950 pelo químico suíço Henri Martin na empresa farmacêutica Cilag (Muñoz; Bleak; Calaf, 2021), o Glifosato foi comercializado em 1970 pela Monsanto sob o nome de Roundup[®], e continua sendo o produto à base de Glifosato mais vendido globalmente (Tauhata *et al.*, 2020).

O Glifosato atua no metabolismo da planta através da inibição da 5-enol-piruvil shiquimato-3-fosfato sintase (EPSP) (Ruszkowski; Forlani, 2022). Assim, as plantas não conseguem sintetizar lignina, alcaloides e flavonoides, levando à interrupção do desenvolvimento das plantas daninhas, acabando por matá-las; no entanto a fitotoxicidade pode atingir também a cultura a ser comercializada (Tauhata *et al.*, 2020). Apesar dos efeitos toxicológicos dos herbicidas, este é ainda um produto extremamente necessário para a agricultura, por conta da demanda global por alimentos (Waring *et al.*, 2020).

Em julho de 2024, a população mundial atingiu 8,2 bilhões de pessoas, segundo estimativas da ONU e as projeções indicam que esse número chegará a 9,7 bilhões em 2050 e a quase 11 bilhões no final do século XXI (ONU, 2024), ao passo que é lógico deduzir que quanto mais habitantes na Terra, maior a necessidade por alimentos. No

entanto, é preciso pensar em maneiras sustentáveis de abastecimento alimentício para que haja melhor qualidade de vida para todas as espécies. Assim sendo, é importante que se faça uma análise de causas que afetem a qualidade de vida dos ecossistemas.

As concentrações de Glifosato encontradas no ambiente variam amplamente, refletindo a complexidade do impacto ecológico. A maior concentração ambientalmente relevante foi identificada como 282,05 mg e.a./L, encontrada em abelhas após sobrevoo (Odemer *et al.*, 2020), enquanto a menor concentração ambientalmente relevante foi observada como 0,000035 mg/L em néctar (Ma *et al.*, 2024b). Estudos demonstram que mesmo em concentrações muito baixas, o Glifosato pode causar alterações na flora intestinal das abelhas, destacando a necessidade de monitoramento contínuo e de avaliações adicionais para entender os efeitos a longo prazo (Zioga; White; Stout, 2022). Concentrações de 0,00294 mg/L, provocam redução na ingestão de açúcar e gera alterações genéticas em *Apis mellifera* (Ma *et al.*, 2018). Concentrações de até 360 mg/L, podem causar alterações na locomoção e comportamento em *T. angustula* (Prado *et al.*, 2023). Isto ressalta a importância de se considerar uma ampla faixa de concentrações ao avaliar os impactos ecológicos do Glifosato, bem como a necessidade de realizar estudos de longo prazo para entender melhor os efeitos subletais e crônicos em organismos não alvo, como as abelhas.

Pensando em organismos terrestres para avaliação da toxicidade do Glifosato, as abelhas são opção em potencial devido à função nos agroecossistemas. É importante considerar que, pelas características de forrageamento e corpo piloso (Zarić; Brodschneider; Goessler, 2022), durante a visitação floral, as abelhas podem carregar componentes tóxicos para a colônia, contaminando-a (Smith *et al.*, 2020). Além disso, a razão do declínio de alguns insetos, incluindo abelhas, pode estar ligada ao uso contínuo de agrotóxicos (Castle *et al.*, 2023). A compreensão detalhada desses impactos pode guiar a formulação de políticas e práticas agrícolas mais seguras e sustentáveis.

Os ambientes tropicais possuem estimativas indicando que estas regiões podem abrigar até 50% das espécies globais de abelhas (Orr *et al.*, 2021). Estudos revelam que, em áreas tropicais, a diversidade de abelhas pode variar entre 100 e 300 espécies por hectare, refletindo a alta complexidade ambiental e a abundância da flora tropical (Valido; Rodríguez-Rodríguez; Jordano, 2019). As abelhas nativas desempenham papel essencial como polinizadoras em florestas neotropicais, exibindo comportamento de forrageamento adaptado aos recursos sazonais disponíveis no ambiente (Urquizo *et al.*, 2022). Por serem nativas da região neotropical e terem raio de voo limitado, essas

abelhas são particularmente sensíveis a mudanças ambientais e a presença de resíduos agrotóxicos, que podem afetar a saúde e comportamento (Quigley; Amdam; Harwood, 2019). Além disso, a natureza social destas abelhas e a formação de colônias pequenas facilitam a coleta de amostras para análise. O mel produzido pode fornecer informações valiosas sobre a presença e os efeitos de agrotóxicos em diferentes ambientes (Kazazic *et al.*, 2020). A compreensão da forma como as abelhas *T. angustula* reagem às mudanças na paisagem e à presença de cultivos diversos, é essencial para avaliar a importância na polinização e o impacto das transformações ambientais sobre elas (Barbosa *et al.*, 2021; Battisti *et al.*, 2021).

Estudos recentes mostram que a abelha-europeia (*A. mellifera*), frequentemente utilizada como espécie padrão, apresenta limiares de toxicidade relativamente altos para pesticidas, com CL_{50} variando entre 10 e 20 $\mu\text{g}/\text{bee}$ para diversos compostos (Yaashikaa; Kumar, 2022). Em contraste, abelhas nativas como *T. angustula* demonstram maior sensibilidade, com limiares de toxicidade frequentemente abaixo de 5 $\mu\text{g}/\text{bee}$ (Biscassi *et al.*, 2024).

Estudar a ecotoxicidade do Glifosato em abelhas é necessário para compreender os impactos ambientais deste herbicida. Pesquisas revisadas indicam que o Glifosato pode ter efeitos adversos significativos sobre as abelhas, fator relevante dado o papel vital destes insetos na polinização e na manutenção da biodiversidade (Battisti *et al.*, 2021). Os efeitos negativos do Glifosato em abelhas saudáveis revelam que estes herbicidas podem comprometer a saúde e a eficiência das abelhas nas funções ecológicas (Shaara; Abuzeid, 2019). O declínio populacional das abelhas é questão urgente, com o uso de herbicidas como o Glifosato sendo um dos fatores a ser considerado (Beringer, 2019). Portanto, é essencial avaliar detalhadamente esses impactos para desenvolver estratégias eficazes de mitigação e proteção das abelhas e dos ecossistemas que elas sustentam.

Estudos comparativos entre a toxicidade do Glifosato e substâncias mais tóxicas, como imidacloprid e pyraclostrobin, revelam que sozinho ou combinado com outras substâncias o Glifosato pode ser prejudicial para as abelhas. Enquanto o Glifosato pode induzir disfunção imune e afetar o metabolismo, substâncias mais tóxicas, como imidacloprid e pyraclostrobin, causam danos diretos no comportamento e nas células de gordura das abelhas (Cham *et al.*, 2019). Além disso, a interação entre esses pesticidas mostra que o Glifosato pode reduzir a eficácia de substâncias mais tóxicas, como o imidacloprid, ampliando os impactos negativos sobre as abelhas (Nicodemo *et al.*,

2020).

Portanto, para determinação da Concentração Letal que mata 10% (CL₁₀) e 50% (CL₅₀) dos organismos da espécie *T. angustula* esta pesquisa avaliou, o efeito agudo tóxico (EAT) e efeito agudo residual (EAR) de Glifosato Padrão Analítico (P.A.) ≥ 98% de pureza e de quatro compostos comerciais à base de Glifosato, sendo eles Glyphotal TR[®], Pocco[®], Pilarsato[®] e Templo[®]. Para além disso, esta pesquisa avaliou em etapas seguintes, baseado em parâmetros subletais - em condições que não causaram letalidade - a Concentração de Efeito Não Observado - CENO (ou NOEC - No Observed Effect Concentration) e a Concentração de Efeito Observado - CEO (ou LOEC - Lowest Observed Effect Concentration) sobre a preferência alimentar da *T. angustula*.

2 . OBJETIVOS

2.1 – Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação foi realizar uma revisão sobre o impacto do Glifosato na saúde das abelhas nativas, com ênfase na espécie *T. angustula*, e avaliar, por meio de experimentação, a ecotoxicidade de diferentes formulações de Glifosato em exposições tópica e residual, visando determinar os efeitos das diversas concentrações de Glifosato e contribuir para práticas agrícolas mais sustentáveis e a preservação da biodiversidade.

2.2 – Objetivos Específicos

Realizar uma revisão sobre o impacto do Glifosato na saúde das abelhas nativas, com ênfase na espécie *T. angustula*;

Determinar a concentração letal para 10% das abelhas (CL₁₀) e para 50% das abelhas (CL₅₀) nas exposições tópica e residual para cada formulação de Glifosato testada, a fim de identificar os níveis de toxicidade associados a cada produto;

Identificar a Concentração de Efeito Não Observado (CENO) e Concentração de Efeito Observado (CEO) para cada formulação de Glifosato, no âmbito de ensaios de preferência alimentar;

Comparar os efeitos tóxicos das diferentes formulações de Glifosato (Glifosato P.A., Glyphotal TR[®], Pocco[®], Pilarsato[®] e Templo[®]) sobre a espécie *T. angustula*, analisando as variações na toxicidade e identificando a formulação que apresentou maior e menor toxicidade;

Discutir a relação entre as concentrações de Glifosato testadas e os impactos ambientais observados, para fornecer dados que possam auxiliar na formulação de práticas agrícolas mais seguras e sustentáveis, e na preservação da biodiversidade.

3. CAPÍTULO 1 - REVISÃO DE LITERATURA

Abelhas Nativas como Bioindicadoras de Poluição Ambiental por Glifosato

RESUMO

Esta revisão examina o impacto do Glifosato, um herbicida não seletivo e pós-emergente amplamente utilizado, sobre a saúde das abelhas nativas, com ênfase na espécie *T. angustula* como bioindicadora de contaminação ambiental. Foram analisados estudos recentes sobre a presença de Glifosato em pólen, néctar e água e os efeitos desta exposição nas abelhas. A revisão inclui dados sobre concentrações ambientalmente relevantes, como $56,0 \pm 2,6$ mg/L em flores, $118,8 \pm 3,9$ mg/L em néctar, $108,2 \pm 5,3$ mg/L em pólen e 282,05 mg e.a./L em abelhas após sobrevoo. As pesquisas revelam que o Glifosato pode ser encontrado em pequenas concentrações em pólen e néctar, variando entre estudos e podendo ter efeitos prejudiciais à saúde das abelhas. A espécie *T. angustula* tem sido particularmente útil para monitorar esses efeitos, mostrando alterações comportamentais e fisiológicas em resposta à exposição ao Glifosato. A exposição ao Glifosato representa risco para as abelhas nativas, impactando a saúde das colônias e a polinização. A revisão destaca a importância de práticas agrícolas mais sustentáveis e o uso de bioindicadores para avaliar os impactos ambientais dos herbicidas.

Palavras-chave: Herbicida, Polinizadores, Ecotoxicidade, Exposição, *T. angustula*.

Native Bees as Bioindicators of Environmental Pollution by Glyphosate

ABSTRACT

This review examines the impact of glyphosate, a widely used non-selective post-emergent herbicide, on the health of native bees, with an emphasis on the species *T. angustula* as a bioindicator of environmental contamination. Recent studies about the presence of glyphosate in pollen, nectar, and water, and the effects of this exposure on bees were analyzed. The review includes data about environmentally relevant concentrations, such as 56.0 ± 2.6 mg/L in flowers, 118.8 ± 3.9 mg/L in nectar, 108.2 ± 5.3 mg/L in pollen, and 282.05 mg a.e./L in bees after flight. Research reveals that glyphosate can be found in small concentrations in pollen and nectar, varying between studies and potentially having harmful effects on bee health. The species *T. angustula* has been particularly useful for monitoring these effects, showing behavioral and physiological changes in response to glyphosate exposure. Glyphosate exposure represents a risk to native bees, impacting colony health and pollination. The review highlights the importance of more sustainable agricultural practices and the use of bioindicators to assess the environmental impacts of herbicides.

Keywords: Herbicide, Pollinators, Ecotoxicity, Exposure, *Tetragonisca angustula*.

3.1 Uso de Herbicidas na Agricultura a Nível Mundial e no Brasil

A agricultura global é marcada pelo crescimento do uso de agrotóxicos, e o Brasil não é exceção neste cenário preocupante. O sistema de produção agrícola predominante no país é o convencional, e tem impulsionado o aumento do uso de agrotóxicos ano após ano (Salomão; Ferro; Ruas, 2020). Entre 2016 e 2021, o consumo de herbicidas no Brasil cresceu aproximadamente 26,3%, passando de 322.755 toneladas para 407.463 toneladas, no mesmo período, resultando em aumento do consumo global de herbicidas, de 5,4%, de 1.641.343,65 toneladas para 1.730.303,03 toneladas (FAOSTAT, 2024). Os números da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAOSTAT) demonstram que a exportação global de pesticidas cresceu significativamente. Foram mais de 41 bilhões de dólares em 2020, com a Europa responsável por 54,7% desse total, e o Brasil importando mais de 3 bilhões de dólares em pesticidas, destes, cerca de 407.463 toneladas de herbicidas, que representa aproximadamente 23,5% do total global de 1.730.303,03 toneladas (FAOSTAT, 2024).

Diante desse cenário, a Europa tem adotado medidas como os regimes agroambientais, o Sistema Europeu Agrícola (AES), destacando o conceito de "herbicida zero", com o objetivo de preservar a qualidade do meio ambiente (Kuhfuss; Subervie, 2018). As AES são reconhecidas na União Europeia como instrumentos que integram políticas agrícolas e ambientais, visando proteger a biodiversidade e restaurar os ecossistemas. Protegendo serviços ecossistêmicos com práticas como reservar 30% dos pagamentos diretos para práticas sustentáveis, como a diversificação de culturas e a preservação de pastagens e reservas ecológicas (Altmann, 2020). Para promover a sustentabilidade agrícola e ajudar na diminuição das alterações climáticas e impactos ao meio ambiente. No entanto, em outras regiões, como na África, a busca pela modernização da agricultura, visando o aumento da produção de alimentos, tem levado ao uso excessivo de herbicidas e toxinas (Horn; Pieters; Bøhn, 2019).

Com base nos dados mais recentes os cinco herbicidas mais consumidos no Brasil em 2022 foram Glifosato, 2,4-D, Atrazina, Glifosato lidera o consumo com 503.720,76 toneladas, seguido por 2,4-D com 120.448,47 toneladas (IBAMA, 2022). O 2,4-D é conhecido por causar impactos significativos em organismos aquáticos, com

efeitos adversos na sobrevivência de peixes em concentrações de até 4,00 ppm (Dehnert; White; Karasov, 2024), e é frequentemente utilizado em combinação com o Glifosato para melhorar o controle de ervas daninhas em culturas como soja e milho (Marochi *et al.*, 2018; Galon *et al.*, 2021). Enquanto o 2,4-D possui toxicidade mais acentuada para organismos não alvo, o Glifosato, embora menos tóxico em exposições agudas, apresenta efeitos adversos mais evidentes em exposições crônicas, especialmente para polinizadores como abelhas (Samanth *et al.*, 2024). A Atrazina, outro herbicida amplamente utilizado, tem sido associada a efeitos disruptores endócrinos e é detectada em concentrações mais elevadas no ambiente do que o Glifosato, e motivou a proposta de proibição no Brasil (De Albuquerque *et al.*, 2020; Varghese *et al.*, 2021; Rohr; McCoy, 2010; Brasil, 2023). Dentre os herbicidas mais amplamente utilizados no mundo, destaca-se o Glifosato, que é adotado desde 1970 e ainda persiste, devido ao cultivo de plantas geneticamente modificadas resistentes a este agrotóxico (Gandhi *et al.*, 2021). Embora sua meia-vida seja relativamente curta, o ácido aminometilfosfônico (AMPA), um metabólito do Glifosato, permanece no solo por mais de quatro anos em concentrações que vão de $0,08 \pm 0,07 \mu\text{g/g}$ a $0,23 \pm 0,21 \mu\text{g/g}$ (Aslam; Jing; Nowak, 2023; Giard *et al.*, 2022). O AMPA é um produto intermediário da biodegradação do Glifosato, formado em solos agrícolas após a aplicação do herbicida (Morrás *et al.*, 2022). Tende a lixiviar e ficar preso em microporos da camada densa do solo, formando resíduos não extraíveis (NERs) xenobióticos, que podem ser remobilizados posteriormente (Mencaroni *et al.*, 2023). A persistência do Glifosato no solo é influenciada por fatores como pH, temperatura, umidade e tipo de solo. Solos ácidos (pH baixo) favorecem a persistência do Glifosato, enquanto solos alcalinos (pH alto) aceleram a degradação (Bento *et al.*, 2016). Temperaturas mais elevadas intensificam a atividade microbiana, promovendo a degradação mais rápida do Glifosato, enquanto temperaturas mais baixas reduzem essa atividade e aumentam a persistência do herbicida (Bento *et al.*, 2016; Kepler *et al.*, 2020).

As concentrações residuais de Glifosato no solo podem variar, com valores observados entre 0,0173 mg/L e 17,3 mg/L (Medalie *et al.*, 2020). A meia-vida do Glifosato também demonstra grande variabilidade, podendo variar de 4 a 100 dias dependendo das condições edáficas e climáticas, a exemplo de chuvas intensas que facilitam a lixiviação, ao passo que a radiação solar pode auxiliar na degradação (Duke,

2020).

Concentrações de Glifosato foram relatadas, com valores de até 6,05 mg/L encontrados em solos agrícolas no Canadá e de 0,0173 a 0,865 mg/L em corpos d'água nos EUA (Trein *et al.*, 2020). O Glifosato e seus produtos de degradação podem ser tóxicos para organismos não alvo, como insetos polinizadores e microrganismos do solo em diferentes níveis de concentração (Marques *et al.*, 2021).

A eficácia e o custo-benefício do Glifosato geram debates sobre a real necessidade, já que estudos apontam que a não utilização pode acarretar impacto negativo na economia, aumentando os gastos em 10% em comparação com outros métodos (Pardo; Martínez, 2019). Por essa razão, os agricultores frequentemente optam pelo uso do Glifosato, preferindo-o, conseguindo evitar a proliferação de ervas daninhas e otimizar a economia de trabalho e despesas, especialmente em grandes propriedades (Danne; Musshoff; Schulte, 2019).

Além disso, evidências mecanicistas indicam que o Glifosato é classificado como possível carcinógeno humano pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) desde 2015 (Rana *et al.*, 2023). A classificação do Glifosato como sendo cancerígeno intensificou o debate sobre seu uso, fazendo com que alguns países, incluindo o México, o proibissem (Alcántara-de la Cruz *et al.*, 2021). Cabe ressaltar que o uso do Glifosato pode causar efeitos ecotoxicológicos graves em espécies vegetais, resultando na perda gradual de biodiversidade na paisagem (Ferreira *et al.*, 2023).

Na tabela 1 estão presentes características físico-químicas e o comportamento ambiental do Glifosato, que é essencial para analisar suas propriedades. Esses dados são fundamentais para avaliar o impacto do Glifosato no meio ambiente.

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do Glifosato.

| Propriedade | Valor |
|-------------------------|---|
| Solubilidade em água | 0,036 g/L (20 °C) ^a |
| K_{ow} | -3,4 ± 0,1 (pH 2,5; 20 °C) ^a |
| Log K_{ow} | -3,2 ^a |
| Potencial de lixiviação | ≈ -1,035 ^b |
| $t^{1/2}$ | 1,9 a 120 dias ^c |
| K_d | 1729 (LE), 155 (PV) ^a |
| K_{des} | 1660 (LE), 232 (PV) ^a |
| K_{oc} | 24 mL/g ^a |

Valores obtidos a partir de ^a(IBAMA, 2019); ^b(Cicilinski; Melo; Peralta-Zamora, 2025); ^c(Ferreira et al., 2023).

Legenda: Solubilidade em Água: Quantidade máxima de substância que se dissolve em água a temperatura ambiente. **Log K_{ow} :** Logaritmo do coeficiente de partição octanol-água, que indica a tendência da substância de acumular em tecidos lipídicos. **K_{ow} :** Coeficiente de partição octanol-água, calculado a partir do log K_{ow} . **Potencial de Lixiviação:** A tendência da substância de mover para águas subterrâneas. **$t^{1/2}$ Campo:** Tempo de meia-vida da substância no solo, indicando a persistência da substância no ambiente.

$t^{1/2}$ Água: Tempo de meia-vida da substância na água. **$t^{1/2}$ Sedimento:** Tempo de meia-vida da substância em sedimentos aquáticos.

K_d : Coeficiente de distribuição da substância entre o solo e a solução do solo.

K_{oc} : Coeficiente de partição entre o carbono orgânico do solo e a solução do solo.

Com base na Tabela 1, é notório que o Glifosato apresenta alta solubilidade em água e baixa adsorção ao solo, sugerindo tendência moderada para lixiviação e mobilidade em ambientes aquáticos. Com potencial de lixiviação indicativo e ampla gama de persistência, o herbicida pode afetar tanto o solo quanto águas subterrâneas, em condições variáveis. A elevada adsorção ao solo, porém, pode mitigar a mobilidade em alguns contextos, enfatizando a necessidade de manejo cuidadoso para minimizar impactos ambientais.

O crescimento do uso de herbicidas, como o Glifosato, tanto globalmente quanto no Brasil, reflete dependência crescente da agricultura convencional para maximizar a produção. A solubilidade elevada e o potencial de lixiviação do Glifosato indicam que, embora seja eficaz no controle de ervas daninhas, a aplicação apresenta riscos para a saúde ambiental. A evidência de que as práticas atuais podem contribuir para a

degradação ambiental ressalta a necessidade urgente de revisar as políticas e estratégias de manejo de herbicidas, promovendo abordagens mais sustentáveis e minimizando os impactos ambientais associados.

3.2 Abelhas nativas como bioindicadores de contaminação ambiental com ênfase nos efeitos do Glifosato em seu organismo

Abelhas nativas desempenham papel crucial como bioindicadores de contaminação ambiental, sendo altamente sensíveis a poluentes e desempenhando a função vital na polinização. Estudos recentes revelam a presença de Glifosato em diversos componentes do ambiente das abelhas, como néctar, pólen e mel, e analisam as concentrações encontradas e seus impactos.

Pesquisas indicam concentrações variadas de Glifosato em pólen e néctar, ao passo que alguns estudos revelam dados importantes a respeito disso e a exemplo da presença de 56.0 ± 2.6 mg/L em flores de *Rubus fruticosus*, 78.4 ± 0.2 mg/L em pólen de abelha e 118.8 ± 3.9 mg/L em néctar da mesma planta após a aplicação do herbicida (Zioga; White; Stout, 2022). Encontrou uma concentração de 204.52 mg/L de Glifosato em néctar coletado de *Bombus impatiens* (Motta; Moran, 2023). Também foram reportadas concentrações de 0.038 ± 0.028 mg/L para Glifosato P.A. em pólen e 0.082 ± 0.061 mg/L em néctar de *Apis mellifera* (Vázquez et al., 2020). A análise também revelou a média de 39.01 ± 0.49 mg/L de Glifosato em pão de abelha, pólen e néctar durante o forrageamento (Thompson et al., 2014).

Uma concentração de 282.05 mg e.a./L de Glifosato foi encontrada em testes com o produto Roundup® em abelhas após o sobrevoos (Odemer et al., 2020). A presença de 1.32 mg/L de Glifosato em águas superficiais indica que a contaminação dos recursos hídricos pode ter implicações indiretas para as abelhas, causando efeitos a longo prazo (Ma et al., 2024c). Concentrações baixas, como 0.000035 mg/L em pólen e néctar de *Apis cerana*, coletados do corpo da abelha após sobrevoos também foram detectadas (Ma et al., 2024a).

Foi registrado que o néctar de várias espécies nativas brasileiras continha a concentração de 0.1171 mg/L de Glifosato (De Souza; Rodrigues; Reyes, 2021). Análises de mel mostraram concentrações variando de 0.00346 mg/L a 9.515 mg/L, com uma média de 0.07266 mg/L em mel comercial, evidenciando a variação significativa na presença do herbicida entre diferentes amostras e períodos de coleta (Rampazzo *et al.*, 2024).

A Agência Nacional de Saúde (ANS), por meio da Lei Resolução nº 617, de 23 de agosto de 2019, propõe manter e fortalecer o Conselho Nacional de Segurança Alimentar (Consea), buscando alimentação saudável e proteção das abelhas, inserindo recomendações como a redução do uso de agrotóxicos (ANS, 2019). Este é um dos motivos pelos quais os impactos dos pesticidas sobre organismos não alvo, especialmente as abelhas, precisam ser avaliados e discutidos com seriedade e compromisso, tanto por pesquisadores quanto por governantes, cada um contribuindo da maneira que lhe cabe.

A tabela a seguir apresenta as concentrações ambientalmente relevantes de Glifosato detectadas em diferentes materiais e espécies, com base em estudos recentes.

Tabela 2 – Concentrações ambientalmente relevantes de Glifosato.

| Material | Espécie | Referência | Produto | Concentrações Encontradas |
|----------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------|--|
| Pólen e néctar | Não identificada | (Zioga; White; Stout, 2022) | Glifosato e AMPA | Flor: 56.0 ± 2.6 mg/L; Néctar: 118.8 ± 3.9 mg/L; Pólen: 108.2 ± 5.3 mg/L |
| Pólen e néctar | <i>Bombus impatiens</i> | (Motta; Moran, 2023) | Glifosato | 204,52 mg/L após o sobrevoo |
| Pólen, néctar | <i>Apis mellifera</i> | (Vázquez <i>et al.</i> , 2020) | Glifosato | Pólen: 0.038 ± 0.028 mg/L; Néctar: 0.082 ± 0.061 mg/L |
| Pólen, néctar | <i>Apis cerana</i> | (Ma <i>et al.</i> , 2024a) | Glifosato | Pólen e néctar: 0.000035 mg/L |
| Néctar | Várias espécies nativas brasileiras | (De Souza; Rodrigues; Reyes, 2021) | Glifosato | Néctar: 0,1171 mg/L |

| | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------|--|
| Néctar e pólen | Várias espécies nativas brasileiras | (Thompson <i>et al.</i> , 2014) | Glifosato | Pólen: 1086,170 mg e.a./L; Néctar: 53,21 mg/L |
| Pão de Abelha, pólen e néctar | Várias espécies nativas brasileiras | (Thompson <i>et al.</i> , 2022) | Glifosato | 39,01 ± 0,49 mg/L durante forrageamento |
| Abelhas | <i>Apis mellifera</i> | (Odemer <i>et al.</i> , 2020) | Glifosato | 282,05 mg/L em abelhas após sobrevoo |
| Água | Não especificado | (Ma <i>et al.</i> , 2024a) | Glifosato | 1,32 mg/L |

Embora Thompson *et al.* (2014) tenham registrado concentrações de Glifosato em pólen (1086,170 mg e.a./L) e néctar (53,21 mg/L) após o sobrevoo de abelhas, essas concentrações não podem mais ser consideradas ambientalmente relevantes. Apesar de simularem condições reais, pesquisas mais recentes do mesmo autor indicam concentrações menores de Glifosato em abelhas (39,01 ± 0,49 mg/L durante forrageamento), é importante utilizar dados atualizados e relevantes para uma avaliação ecotoxicológica mais precisa. Portanto, a maior concentração ambientalmente relevante a ser considerada é de 282,05 mg/L em abelhas após sobrevoo, por Odemer *et al.* (2020).

A falta de dados específicos sobre concentrações ambientalmente relevantes de Glifosato, em abelhas durante o sobrevoo, torna necessário realizar experimentos que simulem as condições reais de exposição para obter estimativas mais precisas (Kocadal *et al.*, 2022). Na ecotoxicologia, quando dados específicos sobre concentrações ambientalmente relevantes são ausentes, as concentrações encontradas em estudos experimentais podem ser utilizadas para estimar a relevância ambiental, desde que os experimentos simulem realisticamente as condições naturais de exposição (Barascou *et al.*, 2021).

Após a identificação das concentrações ambientalmente relevantes de Glifosato em diferentes matrizes ambientais, é importante analisar como essas concentrações afetam espécies de abelhas. Concentrações ambientalmente relevantes de Glifosato podem causar efeitos adversos significativos nas abelhas. Concentrações como 0,0054 mg/L de Glifosato foram suficientes para reduzir a vitalidade e a produtividade das colmeias de *Apis mellifera*, além de impactar negativamente o comportamento social e o

aprendizado das abelhas (Tan *et al.*, 2022). Concentrações de 0,045 mg/L afetaram a microbiota intestinal e as taxas de sobrevivência das abelhas (Helander *et al.*, 2023). Em *B. impatiens*, concentrações de 169 mg/L resultam na redução da abundância de simbiontes benéficos e no aumento do consumo de xarope (Faita *et al.*, 2022). Em *T. angustula*, uma concentração de 360 mg/L causa alterações na locomoção, comportamento e biologia das abelhas (Prado *et al.*, 2023). Esses dados destacam que mesmo níveis baixos de Glifosato encontrados no ambiente podem ter impactos ecológicos significativos nas abelhas. A Tabela 3 resume alguns efeitos observados.

Tabela 3 – Concentrações de Glifosato que causam efeitos em abelhas.

| Produto | Espécie | Referência | Material | Concentrações Encontradas | Efeitos Observados |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| Glifosato e AMPA | <i>Apis mellifera</i> | Herbert <i>et al.</i> , 2014 | Abelhas | 9.86 mg/L | Redução na atividade forrageira |
| Glifosato P.A. | <i>Apis mellifera</i> | Balbuena <i>et al.</i> , 2015 | Pólen, néctar | 2.38 mg/L | Impacto no aprendizado e memória |
| Glifosato | <i>Apis cerana</i> | Tan <i>et al.</i> , 2022 | Pólen, néctar | 0.0001 mg/L | Alterações na expressão gênica e no desenvolvimento larval |
| Glifosato | <i>Bombus impatiens</i> | Motta <i>et al.</i> , 2018 | Néctar | 0,023 mg/L | Desequilíbrio na microbiota intestinal |
| Glifosato | Várias espécies nativas brasileiras | Thompson <i>et al.</i> , 2014 | Néctar e pólen | 340 mg/L | Mortalidade aumentada |
| Glifosato | Várias espécies nativas brasileiras | Thompson <i>et al.</i> , 2022 | Pão de Abelha, pólen e néctar | 0.3 mg/L durante forrageamento | Redução na produção de mel e saúde geral das colônias |
| Glifosato Roundup® | <i>Apis mellifera</i> | Odemer <i>et al.</i> , 2020 | Abelhas | 1.02 mg/L após sobrevo | Comprometimento do sistema |

| | | | | | |
|-----------|------------------|-------------------------|------|----------|---------------------------------------|
| | | | | | imunológico |
| Gilfosato | Não especificado | MA <i>et al.</i> , 2023 | Água | 0.5 mg/L | Toxicidade aguda e crônica em abelhas |

Esses dados ressaltam a importância do monitoramento contínuo e da regulamentação rigorosa do uso de defensivos agrícolas para proteger a saúde ambiental e a biodiversidade. A regulamentação estabelecida pela RDC nº 441, de 2 de dezembro de 2020, estabelece limites e medidas de mitigação para o Glifosato, incluindo limites máximos de resíduo (LMR) e regulamentação do Nível Aceitável de Exposição Ocupacional (AOEL) e da Ingestão Diária Aceitável (IDA) (ANVISA, 2020). A implementação dessas regulamentações é fundamental para reduzir os riscos associados ao uso do herbicida e garantir a proteção dos ecossistemas e da biodiversidade.

Abelhas que apresentam menor atividade forrageira podem reduzir a atividade de polinização (Orr *et al.*, 2021). Ao prejudicar a capacidade de navegação das abelhas, o Glifosato dificulta seu retorno às colônias e aumenta a mortalidade (Valido; Rodríguez-Rodríguez; Jordano, 2019). O impacto do Glifosato também se estende ao aprendizado e à memória das abelhas, afetando a habilidade de encontrar e reconhecer fontes de alimento (Nouvian; Foster; Weidenmüller, 2023). Alterações na expressão gênica e no desenvolvimento larval das abelhas afetam a saúde e reprodução (Ma *et al.*, 2024b). A alteração na microbiota intestinal das abelhas, prejudica sua digestão e absorção de nutrientes (Cullen *et al.*, 2023). A microbiota intestinal das abelhas desempenha papel crucial na digestão de polissacarídeos vegetais e na produção de ácidos graxos de cadeia curta, essenciais para a nutrição e saúde. Gêneros bacterianos como *Gilliamella*, *Snodgrassella* e *Bifidobacterium* são fundamentais nesse processo, auxiliando no metabolismo de carboidratos complexos e na proteção contra patógenos (Kešnerová *et al.*, 2020). Além disso, pesquisas recentes indicam que certas bactérias intestinais das abelhas possuem a enzima EPSPS (5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintase), o que as torna suscetíveis aos herbicidas como o glifosato, afetando negativamente o equilíbrio da microbiota e, conseqüentemente, a saúde das colônias (Motta *et al.*, 2020). A exposição ao glifosato pode provocar disbiose, reduzindo a capacidade de defesa imunológica das abelhas.

Tendo em vista tais conseqüências, é preciso pensar em como os efeitos do

Glifosato a longo prazo poderão afetar o ecossistema.

A análise das concentrações de Glifosato e os impactos nas abelhas nativas evidencia a importância de estratégias de monitoramento e regulamentação para mitigar os efeitos adversos do herbicida e de outros agrotóxicos, destacando a relevância das abelhas como bioindicadores de contaminação ambiental e a necessidade de assegurar a saúde dos ecossistemas.

3.3 – *Tetragonisca angustula* como potenciais bioindicadoras de contaminação ambiental

T. angustula, uma espécie nativa sem ferrão, tem sido utilizada como bioindicadora para avaliar a contaminação ambiental, incluindo a exposição a resíduos de Glifosato (Cham *et al.*, 2019). Seu ciclo de vida completo pode variar de 40 a 50 dias, dependendo das condições de temperatura e disponibilidade de recursos alimentares (Silva; Ramalho; Rosa, 2021).

Estudos indicam que a exposição ao Glifosato pode induzir mudanças comportamentais e fisiológicas nessa espécie, afetando o comportamento de forrageamento e a saúde da colônia (Helander *et al.*, 2023). Essas alterações são preocupantes, pois podem comprometer a capacidade de forrageamento e a eficiência da polinização, com consequências potencialmente graves para a sustentabilidade das colônias (Niu *et al.*, 2023).

A escolha de *T. angustula* como bioindicadoras é estratégica devido ao seu comportamento social e à ampla distribuição geográfica (Pereira; Vítório; Almeida, 2023). Essas abelhas possuem estrutura social que facilita o monitoramento de mudanças dentro da colônia, como taxas de mortalidade e alterações no comportamento de forrageamento (Silva, 2020). Sua presença em diversas regiões permite a comparação de dados em diferentes contextos ambientais, aumentando a abrangência e a relevância dos resultados obtidos (Francisco *et al.*, 2017). O uso de abelhas como bioindicadoras também destaca a importância da conscientização de práticas agrícolas mais sustentáveis e a importância da conservação da biodiversidade (Barbosa *et al.*, 2021; De Andrade *et al.*, 2022). Os dados obtidos a partir do monitoramento de *T. angustula* podem orientar políticas públicas e estratégias de manejo ambiental, promovendo equilíbrio entre produção agrícola e preservação dos ecossistemas (Aluffi *et al.*, 2022). Assim, a aplicação dessas abelhas como bioindicadoras não só contribui para a ciência ecológica, mas, para a sustentabilidade ambiental e a proteção das abelhas

nativas (Araújo *et al.*, 2022).

Portanto, o potencial de bioindicação de *T. angustula* deve ser levado em consideração em estudos ambientais, principalmente pela estrutura social complexa e ampla distribuição geográfica. Seu monitoramento permite avaliar mudanças ambientais e comparar dados em diferentes contextos. Os dados obtidos podem orientar políticas públicas e estratégias de manejo, promovendo equilíbrio entre produção agrícola e preservação dos ecossistemas, enquanto contribuem para a proteção das abelhas nativas e a sustentabilidade ambiental. Atendendo com responsabilidade às demandas globais por alimentos.

3.4 - Perspectivas e Desafios do Glifosato: Impacto nas Abelhas Nativas e a Necessidade de Estratégias Sustentáveis

O uso crescente de herbicidas, especialmente o Glifosato, tem implicações significativas para a saúde ambiental e para as abelhas, que desempenham papel essencial na polinização e na manutenção da biodiversidade (Valido; Rodríguez-Rodríguez; Jordano, 2019). Estudos mostram que a presença de Glifosato em pólen e néctar pode alcançar concentrações que são potencialmente prejudiciais às abelhas (Vázquez *et al.*, 2020). Apesar de algumas pesquisas não encontrarem efeitos significativos a concentrações mais baixas de Glifosato, é importante considerar os impactos potenciais, uma vez que mesmo concentrações subletais podem ter efeitos acumulativos e de longo prazo sobre a saúde das abelhas (Ma *et al.*, 2018; Motta; Moran, 2023).

Os dados disponíveis ressaltam a necessidade de práticas agrícolas sustentáveis e políticas públicas que reduzam a exposição ao Glifosato e outros herbicidas (Valido; Rodríguez-Rodríguez; Jordano, 2019). A implementação de estratégias de mitigação e o monitoramento contínuo das concentrações de Glifosato são essenciais para proteger a saúde das abelhas e a biodiversidade (Cham *et al.*, 2019). Utilizar abelhas nativas como bioindicadores é uma abordagem eficaz para avaliar o impacto ambiental dos herbicidas e ajudar na formulação de políticas mais informadas (Helander *et al.*, 2023; Niu *et al.*, 2023).

Portanto, a crescente aplicação de Glifosato na agricultura representa desafio significativo para a saúde das abelhas e para a biodiversidade que elas sustentam. A utilização de abelhas nativas como bioindicadoras oferece resultados valiosos sobre os

impactos desse herbicida e outros compostos e reforça a necessidade de práticas agrícolas mais responsáveis e sustentáveis. Proteger estas pequenas polinizadoras é necessário não apenas para a saúde ambiental, mas, para a segurança alimentar e o equilíbrio dos ecossistemas. Com mais pesquisa e uma abordagem cuidadosa, pode-se encontrar maneiras de minimizar os riscos e assegurar a vida das abelhas.

Em suma, a exposição ao Glifosato representa uma ameaça para as abelhas nativas, impactando negativamente a saúde das colônias e a polinização. A revisão demonstrou que as concentrações encontradas em pólen, néctar e água podem ter efeitos prejudiciais a abelhas nativas, e.g. *T. angustula*, que servem como potenciais bioindicadores de contaminação ambiental. A necessidade urgente de práticas agrícolas mais sustentáveis e a adoção de estratégias de monitoramento ambiental são evidentes para mitigar esses impactos. Proteger as abelhas e garantir a integridade dos ecossistemas dependem de ações informadas e baseadas em evidências, que promovam a sustentabilidade e a preservação da biodiversidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÁNTARA-DE LA CRUZ, R. *et al.* Glyphosate ban in Mexico: potential impacts on agriculture and weed management. **Pest Management Science**, v. 77, n. 9, p. 3820–3831, 1 set. 2021.

ALTMANN, A. Medidas agroambientais e climáticas da Política Agrícola Comum enquanto instrumento de valorização, restauração e proteção dos serviços ecossistêmicos na União Europeia. **Debater a Europa**, n. 23, p. 41–65, 9 set. 2020.

ALUFFI, M. E. *et al.* Implications of the Use of Glyphosate-Based Herbicides in Agriculture in Argentina—Contribution of Fungi to the Development of Bioremediation Strategies. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3428–3446, 2022.

ANS. RESOLUÇÃO Nº 617, DE 23 DE AGOSTO DE 2019. ANS - AGÊNCIA NACIONAL DE SAÚDE, 2019.

ARAÚJO, E. *et al.* **Análise De Herbicidas Em Corpos Hídricos Da Bacia Hidrográfica Do Rio Preto No Distrito Federal.** 2022.

ASLAM, S.; JING, Y.; NOWAK, K. M. Fate of glyphosate and its degradation products AMPA, glycine and sarcosine in an agricultural soil: Implications for environmental risk assessment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 447, 5 abr. 2023.

BALBUENA, M. S. *et al.* Effects of sublethal doses of glyphosate on honeybee navigation. **Journal of Experimental Biology**, v. 218, n. 17, p. 2799–2805, 1 set. 2015.

BARASCOU, L. *et al.* Pesticide risk assessment in honeybees: Toward the use of behavioral and reproductive performances as assessment endpoints. **Chemosphere**, 2021.

BARBOSA, M. DE M. *et al.* Effects of native forest and human-modified land covers on the accumulation of toxic metals and metalloids in the tropical bee *Tetragonisca angustula*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 215, 2021.

BATTISTI, L. *et al.* Is glyphosate toxic to bees? A meta-analytical review. **Science of the Total Environment**, v. 767, 1 maio 2021.

BENTO, C. *et al.* Persistence of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in loess soil under different combinations of temperature, soil moisture and light/darkness. **The Science of the total environment**, v. 572, p. 301–311, 6 ago. 2016.

BERINGER, J. O declínio populacional das abelhas: causas, potenciais soluções e perspectivas futuras. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 5, p. 18–27, 16 abr. 2019.

BISCASSI, G. F. *et al.* Residual determination and acute toxicity of the neonicotinoid clothianidin in the neotropical stingless bee *Tetragonisca angustula* Latreille, 1811 (*Apidae: Meliponini*). **Chemosphere**, v. 349, 1 fev. 2024.

BRASIL. **Portal da Câmara dos Deputados**. , [s.d.]. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2397900>>. Acesso em Jul. 2024.

CASTLE, D. *et al.* Nutritional resources modulate the responses of three bee species to pesticide exposure. **Journal of Hazardous Materials**, v. 443, 5 fev. 2023.

CHAM, K. O. *et al.* **Pesticide Exposure Assessment Paradigm for Stingless Bees.** Environmental Entomology. **Anais...**2019.

CICILINSKI, A.; MELO, V.; PERALTA-ZAMORA, P. Transporte Mediado Por Coloides E O Seu Efeito Na Dinâmica Dos Poluentes No Solo. **Química Nova**, 2025.

CULLEN, M. G. *et al.* Investigating the effects of glyphosate on the bumblebee proteome and microbiota. **Science of the Total Environment**, v. 864, 15 mar. 2023.

DANNE, M.; MUSSHOFF, O.; SCHULTE, M. Analysing the importance of glyphosate as part of agricultural strategies: A discrete choice experiment. **Land Use Policy**, v. 86, 2019.

DE ALBUQUERQUE, F. P. *et al.* An overview of the potential impacts of atrazine in aquatic environments: Perspectives for tailored solutions based on nanotechnology. **Science of the Total Environment**, 2020.

DE ANDRADE, T. C. G. R. *et al.* Influence of phosphorus fertilization on the response of pinus genotypes to glyphosate subdoses. **New Forests**, v. 53, n. 1, p. 143–160, 1 jan. 2022.

DE SOUZA, A. P. F.; RODRIGUES, N. R.; REYES, F. G. R. Glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) residues in Brazilian honey. **Food Additives and Contaminants: Part B Surveillance**, v. 14, n. 1, 2021.

DEHNERT, G. K.; WHITE, A. M.; KARASOV, W. H. The effects of commercial 2,4-D herbicide on game fish species: Natural lake water vs. laboratory system water. **Chemosphere**, v. 361, 1 ago. 2024.

DUKE, S. O. **Glyphosate: Environmental fate and impact**. Weed Science. **Anais...**2020.

FAITA, M. R. *et al.* Proteomic profiling of royal jelly produced by *Apis mellifera* L. exposed to food containing herbicide-based glyphosate. **Chemosphere**, v. 292, 1 abr. 2022.

FAOSTAT. **Pesticides Trade**. Pesticides use and trade (1990–2021). Disponível em: <[https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/pesticides-use-and-trade-\(1990-2021\)/en](https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/pesticides-use-and-trade-(1990-2021)/en)>. Acesso em: jul. 2024.

FERREIRA, M. F. *et al.* Glyphosate affects the susceptibility of non-target native plant species according to their stage of development and degree of exposure in the

landscape. **Science of the Total Environment**, v. 865, 20 mar. 2023.

FRANCISCO, F. O. *et al.* Population structuring of the ubiquitous stingless bee *Tetragonisca angustula* in southern Brazil as revealed by microsatellite and mitochondrial markers. **Insect Science**, v. 24, n. 5, 2017.

GALON, L. *et al.* Tank mixture of glyphosate and 2,4-D applied on RR[®] maize crop. **Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes**, v. 56, n. 11, 2021.

GANDHI, K. *et al.* **Exposure risk and environmental impacts of glyphosate: Highlights on the toxicity of herbicide co-formulants.** **Environmental Challenges** Elsevier B.V., , 1 ago. 2021.

GIARD, F. *et al.* **Glyphosate and aminomethyphosphonic (AMPA) contents in Brazilian field crops soils.** *Agronomy Science and Biotechnology*, v. 8, p. 1–18, 20 ago. 2022.

HELANDER, M. *et al.* Field-realistic acute exposure to glyphosate-based herbicide impairs fine-color discrimination in bumblebees. **Science of the Total Environment**, v. 857, 2023.

HERBERT, L. T. *et al.* Effects of field-realistic doses of glyphosate on honeybee appetitive behavior. **The Journal of experimental biology**, v. 217, n. Pt 19, p. 3457–64, 2014.

HORN, S.; PIETERS, R.; BØHN, T. A first assessment of glyphosate, 2,4-D and Cry proteins in surface water of South Africa. **South African Journal of Science**, v. 115, n. 9–10, 2019.

IBAMA. **Painéis de informações de agrotóxicos.** Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/paineis-de-informacoes-de-agrotoxicos>>. Acesso em: 26 jul. 2024.

IBAMA. **Perfil Ambiental - Glifosato Sal de Amônio - 02_10_2019.** — Ibama. Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/arquivos/perfis-ambientais/2019/Perfil%20Ambiental%20-%20Glifosato%20Sal%20de%20Amn>

io%20-%2002_10_2019.pdf/view>. Acesso em: 26 jul. 2024.

KEPLER, R. M. *et al.* Soil microbial communities in diverse agroecosystems exposed to the herbicide glyphosate. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 86, n. 5, 2020.

KEŠNEROVÁ, L.; MARS, R. A. T.; ELLEGAARD, K. M.; TROILO, M.; SAUER, U.; ENGEL, P. Gut microbiota structure differs between honeybees in winter and summer. **Nature Ecology & Evolution**, v. 4, n. 9, p. 1210-1220, 2020

KOCADAL, K. *et al.* A review on advances and perspectives of glyphosate determination: challenges and opportunities. **Archives of Environmental Protection**, v. 48, n. 3, p. 89–98, 2022.

KUHFUSS, L.; SUBERVIE, J. Do European Agri-environment Measures Help Reduce Herbicide Use? Evidence From Viticulture in France. **Ecological Economics**, v. 149, p. 202–211, 1 jul. 2018.

LOPES, C. V. A.; ALBUQUERQUE, G. S. C. DE. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde em Debate**, v. 42, n. 117, p. 518–534, jun. 2018.

MA, C. *et al.* Combined pesticides in field doses weaken honey bee (*Apis cerana F.*) flight ability and analyses of transcriptomics and metabolomics. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 201, 2024a.

MA, C. *et al.* Impact of chronic exposure to field level glyphosate on the food consumption, survival, gene expression, gut microbiota, and metabolomic profiles of honeybees. **Environmental Research**, v. 250, 1 jun. 2024b.

MA, L. *et al.* **Bacterial Strategies for Improving the Yield, Quality, and Adaptability of Oil Crops. Agriculture (Switzerland)**, 2024c.

MA, M. *et al.* Isolation of carboxylesterase (esterase FE4) from *Apis cerana cerana* and its role in oxidative resistance during adverse environmental stress. **Biochimie**, v. 144, 2018.

MAROCHI, A. *et al.* Managing glyphosate-resistant weeds with cover crop associated with herbicide rotation and mixture, Manejando plantas daninhas resistentes ao

Glifosato com cultura de cobertura associada a rotação e mistura de herbicidas. **Ciência e Agrotecnologia**, 2018.

MARQUES, J. G. DE C. *et al.* **Glyphosate: A Review on the Current Environmental Impacts from a Brazilian Perspective. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, 2021.

MEDALIE, L. *et al.* Influence of land use and region on glyphosate and aminomethylphosphonic acid in streams in the USA. **Science of the Total Environment**, v. 707, 10 mar. 2020.

MENCARONI, M. *et al.* Glyphosate and AMPA dynamics during the transition towards conservation agriculture: Drivers under shallow groundwater conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 229, 1 maio 2023.

MEROTTO, A. *et al.* **Herbicide use history and perspective in South America. Advances in Weed Science.** Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninha, , 2022.

Ministério da Saúde-MS Agência Nacional de Vigilância Sanitária-ANVISA. ANVISA. Disponível em: <<https://www.gov.br/anvisa/pt-br>>. Acesso em JUL 2024.

MORRÁS, H. *et al.* Soil structure and glyphosate fate under no-till management in the Pampa region. II. Glyphosate and AMPA persistence and spatial distribution in the long-term. A conceptual model. **Soil and Tillage Research**, v. 223, 1 set. 2022.

MOTTA, *et al.* Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, n. 41, p. 10305–10310, 24 set. 2018.

MOTTA, E. V. S.; MORAN, N. A. The effects of glyphosate, pure or in herbicide formulation, on bumble bees and their gut microbial communities. **Science of the Total Environment**, v. 872, 10 maio 2023.

MOTTA, E. V. S.; MAUCLINE, T. H.; MORAN, N. A. Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 41, p. 10305-10310, 2020

MUÑOZ, J. P.; BLEAK, T. C.; CALAF, G. M. **Glyphosate and the key characteristics of an endocrine disruptor: A review. Chemosphere Elsevier Ltda**, , 1 maio 2021.

NICODEMO, D. *et al.* Mitochondrial Respiratory Inhibition Promoted by Pyraclostrobin in Fungi is Also Observed in Honey Bees. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 39, n. 6, 2020.

NIU, X. J. *et al.* Fox transcription factor AccGRF1 in response to glyphosate stress in *Apis cerana cerana*. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 192, 1 maio 2023.

NOUVIAN, M.; FOSTER, J. J.; WEIDENMÜLLER, A. Glyphosate impairs aversive learning in bumblebees. **Science of the Total Environment**, v. 898, 10 nov. 2023.

ODEMER, R. *et al.* Chronic high glyphosate exposure delays individual worker bee (*Apis mellifera l.*) development under field conditions. **Insects**, v. 11, n. 10, 2020.

ONU. **World Population Prospects 2024 Summary of Results Ten key messages**. World Population Prospects 2024 | Population Division. Disponível em: <<https://www.un.org/development/desa/pd/world-population-prospects-2024>>.

ORR, M. C. *et al.* Global Patterns and Drivers of Bee Distribution. **Current Biology**, v. 31, n. 3, 2021.

PARDO, G.; MARTÍNEZ, Y. Conservation agriculture in trouble? Estimating the economic impact of an eventual glyphosate prohibition in Spain. **Planta Daninha**, v. 37, 2019.

PEREIRA, R. DO C.; VITÓRIO, C. V. A.; ALMEIDA, J. R. DE. Monitoramento De Bioindicadores Na Via Transolímpica, Rio De Janeiro – Brasil. **Revista Internacional de Ciências**, v. 13, 2023.

PRADO, I. S. *et al.* Glyphosate-based formulation affects *Tetragonisca angustula* worker's locomotion, behavior and biology. **Ecotoxicology**, v. 32, n. 4, 2023.

QUIGLEY, T. P.; AMDAM, G. V.; HARWOOD, G. H. **Honey bees as bioindicators of changing global agricultural landscapes**. **Current Opinion in Insect Science** Elsevier Inc., , 1 out. 2019.

RAMPAZZO, G. *et al.* Determination of glyphosate, glufosinate, and metabolites in honey based on different detection approaches supporting food safety and official controls. **LWT**, v. 200, 15 maio 2024.

RANA, I. *et al.* **Mapping the key characteristics of carcinogens for glyphosate and its formulations: A systematic review.** *Chemosphere* Elsevier Ltd, , 1 out. 2023.

ROHR, J. R.; MCCOY, K. A. **A qualitative meta-analysis reveals consistent effects of atrazine on freshwater fish and amphibians.** *Environmental Health Perspectives*, 2010.

RUSZKOWSKI, M.; FORLANI, G. Deciphering the structure of *Arabidopsis thaliana* 5-enol-pyruvyl-shikimate-3-phosphate synthase: An essential step toward the discovery of novel inhibitors to supersede glyphosate. **Computational and Structural Biotechnology Journal**, v. 20, p. 1494–1505, 1 jan. 2022.

SALOMÃO, P. E. A.; FERRO, A. M. S.; RUAS, W. F. Herbicidas no Brasil: uma breve revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 2, p. e32921990, 1 jan. 2020.

SAMANTH, A. *et al.* Efficient adsorptive removal of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) using biomass derived magnetic activated carbon nanocomposite in synthetic and simulated agricultural runoff water. **Chemosphere**, v. 361, 1 ago. 2024.

SHAARA, H. F.; ABUZEID, M. A. Effects of two herbicides on healthy and *Nosema* infected honey bee workers IAEES Publications. **Art hropods**, 2019.

SILVA, M. D. E; RAMALHO, M.; ROSA, J. F. Annual survival rate of tropical stingless bee colonies (*Meliponini*): variation among habitats at the landscape scale in the Brazilian Atlantic Forest. **Sociobiology**, v. 68, n. 1, p. 5147, 22 fev. 2021.

SILVA, S. D. Challenging the environmental history of the Cerrado: Science, biodiversity and politics on the Brazilian agricultural frontier. **Historia Ambiental Latinoamericana y Caribena**, v. 10, n. 1, 2020.

SMITH, K. E. *et al.* Honey Maps the Pb Fallout from the 2019 Fire at Notre-Dame Cathedral, Paris: A Geochemical Perspective. **A Geochemical Perspective. Environmental Science and Technology Letters**, v. 7, p. 753–759, 2020.

TAN, S. *et al.* Effects of glyphosate exposure on honeybees. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, 2022.

TAUHATA, S. B. F. *et al.* The glyphosate controversy: an update. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 87, 2020.

THOMPSON, H. M. *et al.* Evaluating exposure and potential effects on honeybee brood (*Apis mellifera*) development using glyphosate as an example. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 10, n. 3, p. 463–470, 1 jul. 2014.

THOMPSON, L. J. *et al.* Bumblebees can be Exposed to the Herbicide Glyphosate when Foraging. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 41, n. 10, 2022.

TREIN, C. M. *et al.* French vertical flow treatment wetlands in a subtropical climate: Characterization of the organic deposit layer and comparison with systems in France. **Science of the Total Environment**, v. 742, 2020.

URQUIZO, O. N. *et al.* Pollen Preference Patterns by *Tetragonisca angustula* (Apidae: Meliponini) in a Boliviano–Tucumano Forest. **Neotropical Entomology**, v. 51, n. 5, p. 649–659, 2022.

VALIDO, A.; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, M. C.; JORDANO, P. Honeybees disrupt the structure and functionality of plant-pollinator networks. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 2019.

VARGHESE, J. V. *et al.* Pesticide applicators and cancer: A systematic review. **Reviews on Environmental Health**, 2021.

VÁZQUEZ, D. E. *et al.* Chronic exposure to glyphosate induces transcriptional changes in honey bee larva: A toxicogenomic study. **Environmental Pollution**, v. 261, 1 jun. 2020.

WARING, B. G. *et al.* From pools to flow: The PROMISE framework for new insights on soil carbon cycling in a changing world. **Global Change Biology**, v. 26, n. 12, 2020.

YAASHIKAA, P. R.; KUMAR, P. S. Bioremediation of hazardous pollutants from agricultural soils: A sustainable approach for waste management towards urban sustainability. **Environmental Pollution**, v. 312, 2022.

ZARIĆ, N. M.; BRODSCHNEIDER, R.; GOESSLER, W. Honey bees as biomonitors – Variability in the elemental composition of individual bees. **Environmental Research**, v. 204, 1 mar. 2022.

ZIOGA, E.; WHITE, B.; STOUT, J. C. Glyphosate used as desiccant contaminates plant pollen and nectar of non-target plant species. **Heliyon**, v. 8, n. 12, 1 dez. 2022.

4 - CAPÍTULO II

Ecotoxicidade de Herbicidas à base de Glifosato em *Tetragonisca angustula*: Avaliação de Exposições Tópica, Residual e Preferência Alimentar

RESUMO

Este estudo avaliou a toxicidade do Glifosato e de quatro produtos comerciais à base de Glifosato sobre a espécie de abelha nativa *T. angustula*, com foco em exposições tópica e residual, além da preferência alimentar. Nos testes tópicos, os valores de concentração letal capaz de matar 50% dos organismos (CL₅₀) foram: Pocco® com 8898,980 mg e.a./L, Glyphotal TR® com 9801,760 mg e.a./L, Pilarsato® com 13332,300 mg e.a./L e Glifosato PA com 58355,900 mg e.a./L. Isso indica que Pocco® foi mais tóxico < Glyphotal TR® < Pilarsato® < Glifosato P.A.. Nos testes residuais, Pilarsato® foi o mais letal com um CL₅₀ de 945,494 mg e.a./L, seguido por Glyphotal TR® com 4136,940 mg e.a./L, Pocco® com 6424,700 mg e.a./L, Templo® com 15182,900 mg e.a./L e Glifosato PA com 58355,900 mg e.a./L. Assim, Pilarsato® foi mais tóxico < Glyphotal TR® < Pocco® < Templo® < Glifosato PA. No ensaio de preferência alimentar, o Glifosato PA apresentou Concentração de Efeito Não Observado (CENO) de 500 mg e.a./L e Concentração de Efeito Observado (CEO) de 1000 mg e.a./L. O Glyphotal TR® e o Pocco® ambos tiveram CENO de 2000 mg e.a./L e CEO de 4000 mg e.a./L. O Pilarsato® mostrou CENO de 1600 mg e.a./L e CEO de 3200 mg e.a./L, e o Templo® teve CENO de 4000 mg e.a./L e CEO de 8000 mg e.a./L. Assim, a toxicidade alimentar dos compostos foi Glifosato PA < Pilarsato® < Glyphotal TR® = Pocco® < Templo®. Os resultados deste estudo destacam a variação significativa na toxicidade de diferentes produtos comerciais e do Glifosato puro para a espécie nativa *T. angustula*, com produtos como Pocco® e Pilarsato® mostrando maior toxicidade em exposições tópicas e residuais, respectivamente. Embora alguns produtos tenham demonstrado menor toxicidade imediata, a análise de preferência alimentar revelou que mesmo concentrações subletais podem impactar o comportamento alimentar das abelhas, potencialmente afetando a eficiência da polinização e a saúde das colônias. Esses achados ressaltam a importância de considerar os impactos crônicos e a necessidade de práticas agrícolas sustentáveis. O estudo contribui significativamente para a compreensão dos riscos associados ao uso de herbicidas e reforça a necessidade de regulamentações rigorosas para proteger polinizadores e promover a biodiversidade.

Palavras-chave: Herbicida não seletivo, Efeitos Letais, Efeitos Subletais, Polinizadores, Abelha Sem Ferrão, Ecotoxicologia.

Ecotoxicity of Glyphosate-based Herbicides on *Tetragonisca angustula*: Evaluation of Topical, Residual, and Feeding Preference Exposures

ABSTRACT

This study evaluated the toxicity of glyphosate and four commercial glyphosate-based products on the native bee species *T. angustula*, focusing on topical and residual exposures, as well as feeding preference. In topical tests, the lethal concentration values capable of killing 50% of the organisms (LD₅₀) were: Pocco® at 8898.980 mg a.i./L, Glyphotal TR® at 9801.760 mg a.i./L, Pilarsato® at 13332.300 mg a.i./L, and pure glyphosate at 58355.900 mg a.i./L. This indicates that Pocco® was more toxic < Glyphotal TR® < Pilarsato® < pure glyphosate. In residual tests, Pilarsato® was the most lethal with an DL₅₀ of 945.494 mg a.i./L, followed by Glyphotal TR® at 4136.940 mg a.i./L, Pocco® at 6424.700 mg a.i./L, Templo® at 15182.900 mg a.i./L, and pure glyphosate at 58355.900 mg a.i./L. Thus, Pilarsato® was more toxic < Glyphotal TR® < Pocco® < Templo® < pure glyphosate. In the feeding preference assay, pure glyphosate presented a No Observed Effect Concentration (NOEC) of 500 mg a.i./L and a Lowest Observed Effect Concentration (LOEC) of 1000 mg a.i./L. Glyphotal TR® and Pocco® both had a NOEC of 2000 mg a.i./L and an LOEC of 4000 mg a.i./L. Pilarsato® showed a NOEC of 1600 mg a.i./L and an LOEC of 3200 mg a.i./L, and Templo® had a NOEC of 4000 mg a.i./L and an LOEC of 8000 mg a.i./L. Therefore, the feeding toxicity of the compounds was pure glyphosate < Pilarsato® < Glyphotal TR® = Pocco® < Templo®. The results of this study highlight the significant variation in the toxicity of different commercial products and pure glyphosate to the native species *T. angustula*, with products like Pocco® and Pilarsato® showing higher toxicity in topical and residual exposures, respectively. Although some products demonstrated lower immediate toxicity, the feeding preference analysis revealed that even sublethal concentrations could impact the bees' feeding behavior, potentially affecting pollination efficiency and colony health. These findings underscore the importance of considering chronic impacts and the need for sustainable agricultural practices. The study significantly contributes to the understand of the risks associated with herbicide use and reinforces the need for stringent regulations to protect pollinators and promote biodiversity.

Keywords: Non-selective herbicide, Lethal effects, Sub-lethal effects, Pollinators, Stingless Bee, Ecotoxicology.

4.1 - Introdução

A crescente dependência de herbicidas na agricultura moderna é reflexo da necessidade de métodos eficazes para controlar plantas daninhas que competem com as culturas agrícolas por água, nutrientes e luz solar (Vázquez *et al.*, 2020). Esses produtos químicos são essenciais para manter a produtividade agrícola e atender à crescente demanda alimentar global. No entanto, a aplicação intensiva de herbicidas também levanta preocupações sobre os impactos ambientais e a segurança ecológica, especialmente no que diz respeito a organismos não alvo, como as abelhas (Ma *et al.*, 2018).

O Glifosato é um dos herbicidas mais amplamente utilizados pela eficácia e amplo espectro de ação (Odemer *et al.*, 2020). A molécula de Glifosato age inibindo a enzima 5-enol-piruvil shiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), que é essencial para a biossíntese de aminoácidos aromáticos em plantas e microrganismos (Gandhi *et al.*, 2021). Ao bloquear essa via metabólica, o Glifosato impede o crescimento das plantas daninhas, resultando em sua morte (Samanth *et al.*, 2024). Esse mecanismo específico contribui para a popularidade do herbicida, levantando preocupações sobre os efeitos indiretos em organismos expostos, como as abelhas (Thompson *et al.*, 2022).

A espécie *T. angustula*, uma abelha nativa, é particularmente relevante para a avaliação dos impactos ambientais pelas características e papel ecológico (Motta; Moran, 2023). Pequena e altamente eficiente na polinização, *T. angustula* desempenha papel na manutenção da biodiversidade e na saúde dos ecossistemas (Prado *et al.*, 2023). As interações com fontes de néctar e pólen a tornam excelente bioindicador para monitorar a presença e os efeitos de contaminantes ambientais, como o Glifosato (Zioga; White; Stout, 2022).

O Glifosato pode afetar a saúde e o comportamento de abelhas nativas, incluindo *T. angustula* (Ferreira *et al.*, 2023). Alterações no comportamento de forrageamento, diminuição na eficiência da polinização e impactos na sobrevivência das colônias foram observados, evidenciando a necessidade de compreender os efeitos específicos do Glifosato em *T. angustula* (Prado *et al.*, 2023).

Neste contexto, este trabalho avaliou a toxicidade do Glifosato na *T. angustula* através de testes de Efeito Agudo Tópico (EAT), Efeito Agudo Residual (EAR) e preferência alimentar, para determinar as concentrações que causaram efeito deletério em 10% dos organismos em 48 horas (CL₁₀₋₄₈), as concentrações que causaram efeito

letal em 50% dos organismos em 48 horas (CL_{50-48}), a Concentração de Efeito Não Observado (CENO) e a Concentração de Efeito Observado (CEO) no consumo de alimentos, por um período de exposição de 24 horas.

4.2 - Material e métodos

4.2. 1 - Manutenção de *T. angustula*

As abelhas *T. angustula* utilizadas para os testes estão localizadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - IF Goiano - Campus Rio Verde. As abelhas nativas foram previamente capturadas em iscas de embalagens Tetra Pak[®] e garrafas de polietileno tereftalato (Oliveira *et al.*, 2023).

4.2.2 - Aquisição dos Herbicidas

O levantamento foi realizado em lojas especializadas, revendedoras autorizadas e no comércio de insumos agrícolas no sudoeste do estado de Goiás, teve como objetivo identificar os produtos à base de Glifosato disponíveis no mercado e mais relevantes para o controle de plantas daninhas. A partir desse levantamento, os compostos à base de Glifosato testados foram selecionados com base na disponibilidade de recursos, resultando na escolha dos seguintes compostos: Pilarsato[®] da Sumitomo Chemical Brasil Ltda., Pocco[®] da Makhteshim Agan do Brasil Ltda., Templo[®] da Bayer S.A., e Glyphotal[®] da Jiangsu Vinyan Speciality Chemicals Co., Ltda. Esses produtos foram adquiridos por meio de doações do laboratório de plantas daninhas da instituição, bem como de produtores e empresas da região de Rio Verde - GO. Embora os três produtos mais vendidos identificados no levantamento - Roundup Transorb[®] da Monsanto do Brasil Ltda., Glyphotal[®] e Zapp QI[®] da Syngenta Limited - Huddersfield Manufacturing Centre[®] - não tenham sido incluídos nos ensaios atuais, eles representam opções valiosas para futuras investigações. A aquisição do Glifosato Padrão Analítico (P.A.), com pureza mínima de 98,0%, da Sigma Aldrich[®], foi realizada com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (Fapeg) e do Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP).

4.2.3 - Ensaios para determinação da CL₁₀ e CL₅₀ sobre *T. angustula*

Os ensaios com abelhas nativas foram adaptados seguindo os métodos descritos por Jacob *et al.* (2019) e Oliveira *et al.* (2023). As abelhas foram coletadas diretamente do orifício de entrada das colônias entre 10h30min e 15h30min e mantidas em temperatura entre 25 e 27°C ao longo dos experimentos. Esse controle foi realizado através da regulação do ar-condicionado, ajustando a temperatura conforme necessário para assegurar que os valores permanecessem dentro da faixa estabelecida. Os organismos foram mantidos em ambiente escuro durante todo o período de teste.

Para a avaliação da toxicidade aguda tópica (EAT) e da toxicidade aguda residual (EAR), foram utilizadas gaiolas de PET de 73 mm de diâmetro e 79 mm de altura, revestidas com papel filtro comercial. As gaiolas continham alimentadores com tubos de microcentrífuga transparentes de 2 mL, forrados com algodão para facilitar a alimentação das abelhas e prevenir afogamento. As exposições foram realizadas com 10 abelhas operárias forrageiras de *T. angustula* por réplica, totalizando 30 organismos para cada tipo de ensaio.

No ensaio de EAT, as abelhas foram expostas a névoa contaminada com 350 µL de volume, representando concentrações típicas encontradas em ambientes naturais e no pólen. A exposição durou 1 minuto e os efeitos foram monitorados por 48 horas. Para o ensaio de EAR, as abelhas foram mantidas em jejum por 30 minutos antes de serem alimentadas com um xarope (água e açúcar na proporção 1:1) contaminado. A exposição ao xarope ocorreu por 30 minutos, com monitoramento dos efeitos por 48 horas.

As concentrações de Glifosato testadas foram 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 e 32000 mg/L (se P.A.) ou mg e.a./L (se compostos comerciais), com um tratamento controle usando água destilada. As concentrações foram determinadas com base em ensaios ecotoxicológicos preliminares e na literatura existente sobre níveis ambientais de Glifosato. Para ambos os testes, as soluções-estoque de Glifosato PA e outros produtos comerciais foram preparadas em água destilada em uma concentração de 100000 mg/L (se P.A.) ou mg e.a./L (se compostos comerciais). As concentrações de teste foram obtidas a partir destas soluções-estoque, preparadas até no máximo um dia antes do experimento e mantidas a 4°C em embalagem de PET e revestidas com papel alumínio. Como padrão de referência, foi utilizado o Dimetoato, recomendado pela

OECD (2000) e validado por Oliveira *et al.* (2023) para ensaios agudos com abelhas nativas, incluindo *T. angustula*.

4.2.4 - Teste de preferência alimentar

Os testes de preferência alimentar para *T. angustula* foram adaptados com base na metodologia descrita por Silva *et al.* (2016). Inicialmente, 10 abelhas foram coletadas na entrada do ninho e colocadas em gaiolas de PET de 250 ml, com dimensões de 73 mm de diâmetro e 79 mm de altura com tampa, forradas com papel filtro qualitativo. E foram mantidas em jejum por 30 minutos para garantir um padrão confiável de hábitos alimentares. As abelhas coletadas pertenciam à mesma colônia, a fim de manter a consistência nos hábitos alimentares. Após a coleta, as abelhas foram transferidas para o laboratório e expostas à temperatura de 25°C - esta temperatura foi medida em todos os testes e controlada pelo aparelho de ar-condicionado - por no mínimo 15 minutos para ambientação. Este tempo de adaptação foi necessário para que fosse mais fácil manusear a troca de alimentos, sem que se perdessem abelhas no processo.

O procedimento experimental envolveu a substituição do alimento não contaminado por alimentos contaminados após o período de 30 minutos. O alimento contaminado foi preparado em tubos de microcentrífuga transparente de 2 ml com pequenas perfurações feitas com uma agulha entomológica (tampados para não escoar o xarope), inseridos na tampa da gaiola experimental. As concentrações de contaminantes incluíam oito variações para cada composto (P.A. e Compostos comerciais), misturadas em uma proporção de 1:1 com xarope, além do controle – conforme descrito no tópico anterior.

A temperatura do ambiente foi mantida entre 25 e 27°C durante o experimento, com ajustes na configuração do ar-condicionado realizados conforme necessário para garantir que a temperatura permanecesse dentro dessa faixa. As abelhas foram expostas a essas condições em um ambiente escuro ao longo do período total do teste, que durou 24 horas.

Para avaliar a preferência alimentar, os tubos foram pesados antes e após a colocação do alimento. Após 24 horas de exposição, o volume final restante foi subtraído do volume inicial, permitindo a determinação do volume consumido pelas 10 abelhas. O volume total consumido foi então dividido pelo número de abelhas na

amostra para calcular a média consumida por abelha.

4.3. Análise estatística dos dados

A concentração letal para 10% (CL_{10}) e para 50% (CL_{50}) de Glifosato puro (P.A.) e dos quatro diferentes herbicidas à base de Glifosato em *T. angustula* foram estimadas por meio de análise de Probit, utilizando o software estatístico Minitab 21[®] (Minitab Inc., State College, PA, USA).

Para os ensaios de preferência alimentar com *T. angustula*, a análise estatística foi realizada utilizando ANOVA para comparar as médias das diferentes concentrações. A ANOVA foi precedida pelo teste de homogeneidade de variância de Brown-Forsythe e pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk para garantir a adequação dos dados. As Concentrações de Efeito Não Observado (CENO) e as Concentrações de Efeito Observado (CEO) foram determinadas através de testes de múltiplas comparações de Dunnett. As análises estatísticas ANOVA foram conduzidas utilizando o software GraphPad Prism versão 10.0 (GraphPad Software, La Jolla, CA, USA).

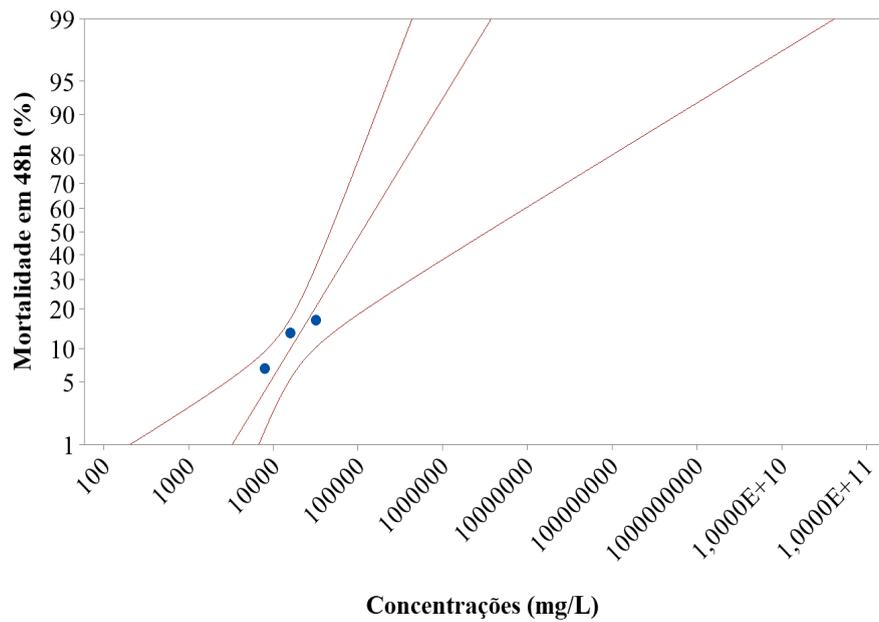
5 - Resultados

Os resultados dos testes de toxicidade aguda para diferentes formulações de Glifosato em *T. angustula* revelaram variações na toxicidade entre os compostos e os tipos de exposição (tópica e residual) (Tabela 4). Também, as Figuras 1, 2, 3, 4 e 5 (a e b) evidenciam a probabilidade de mortalidade de *T. angustula* quando expostas ao EAT e a probabilidade de mortalidade de *T. angustula* quando expostas ao EAR.

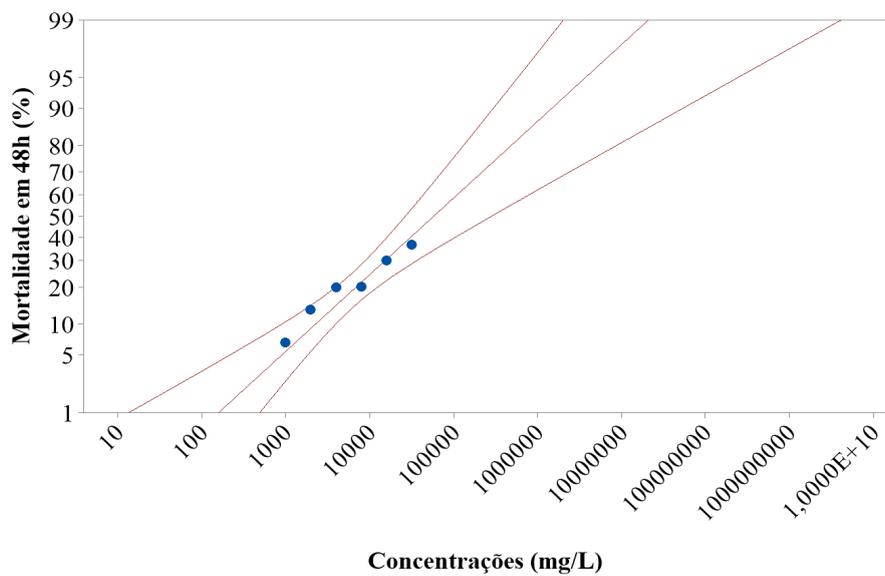
Para o Glifosato P.A., observou-se que a CL_{50} foi de 58.355,900 mg/L para EAR e 110775 para EAT, indicando que esse produto é o menos tóxico entre os testados. A CL_{10} foi de 15.926,8 mg/L na exposição tópica (Figura 1a) e 2.269,83 mg/L na exposição residual (Figura 1b), mostrando que o Glifosato P.A. também é o menos tóxico em termos de CL_{10} . Dados representados abaixo:

Figura 1 - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tópico(a) e residual(b) expostas em um período de 48 horas a concentrações de Padrão Analítico de Glifosato. Análise por Probit: Mortalidade; Observações versus Concentrações (mg/L).

a)



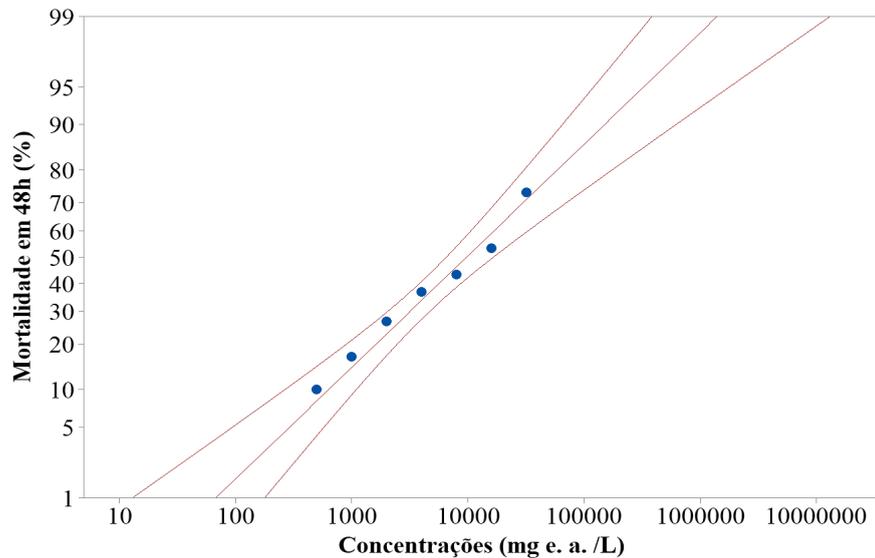
b)



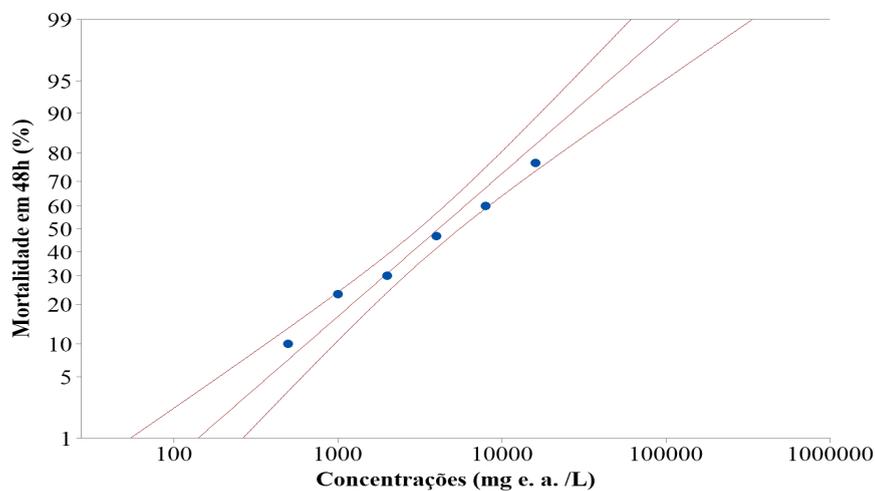
O Glyphotal TR[®] apresentou uma CL₅₀ menor, de 9.801,760 mg e.a./L para a exposição tópica (Figura 2a) e 4.136,940 mg e.a./L para a exposição residual (Figura 2b), indicando maior toxicidade em comparação com o Glifosato P.A. A CL₁₀ foi de 635,298 mg e.a./L na exposição tópica (Figura 2a) e 644,114 mg e.a./L na exposição residual (Figura 2b), sugerindo que Glyphotal TR[®] tem toxicidade mais elevada que o Glifosato P.A., mas toxicidade um pouco menor em testes residuais. As CL₁₀ e CL₅₀ do Glyphotal TR[®] estão representadas na figura a seguir.

Figura 2 - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tópico(a) e residual(b) expostas em um período de 48 horas ao produto Glyphotal TR[®]. Análise por Probit: Mortalidade; Observações versus Concentrações (mg/L)

a)



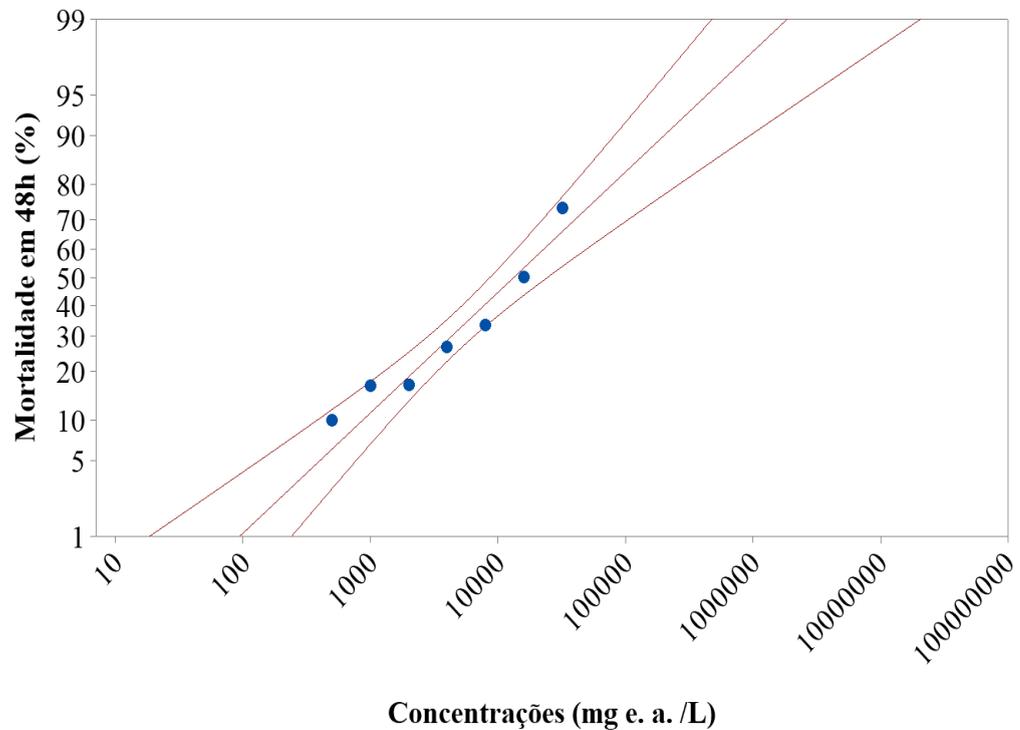
b)



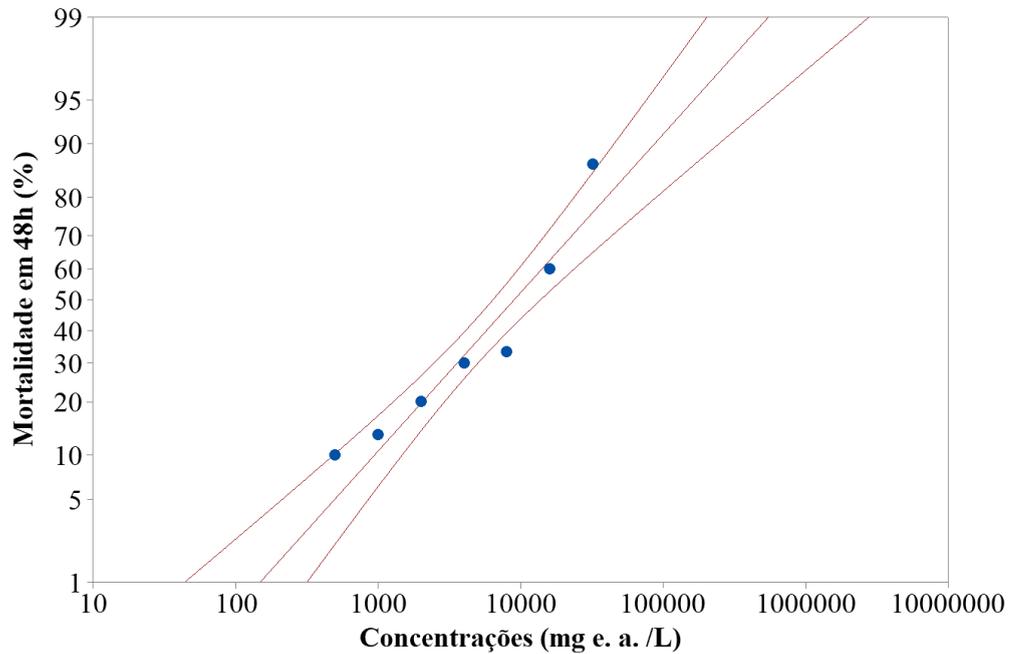
O Pilarsato[®] teve uma CL_{50} de 13.332,300 mg e.a./L na exposição tópica (Figura 3a) e 945,494 mg e.a./L na residual (Figura 3b), indicando que é mais tóxico que o Glifosato P.A., mas menos tóxico que o Glyphotal TR[®]. A CL_{10} foi de 874,485 mg e.a./L na exposição tópica (Figura 3a) e igual a 945,494 mg e.a./L na exposição residual (Figura 3b), mostrando que Pilarsato[®] apresenta toxicidade semelhante para ambos os tipos de exposição. Esses resultados são detalhados nos gráficos apresentados nas Figuras 3a e 3b.

Figura 3 - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tópico(a) e residual(b) expostas em um período de 48 horas ao produto Pilarsato[®]. Análise por Probit: Mortalidade; Observações versus Concentrações (mg/L).

a)



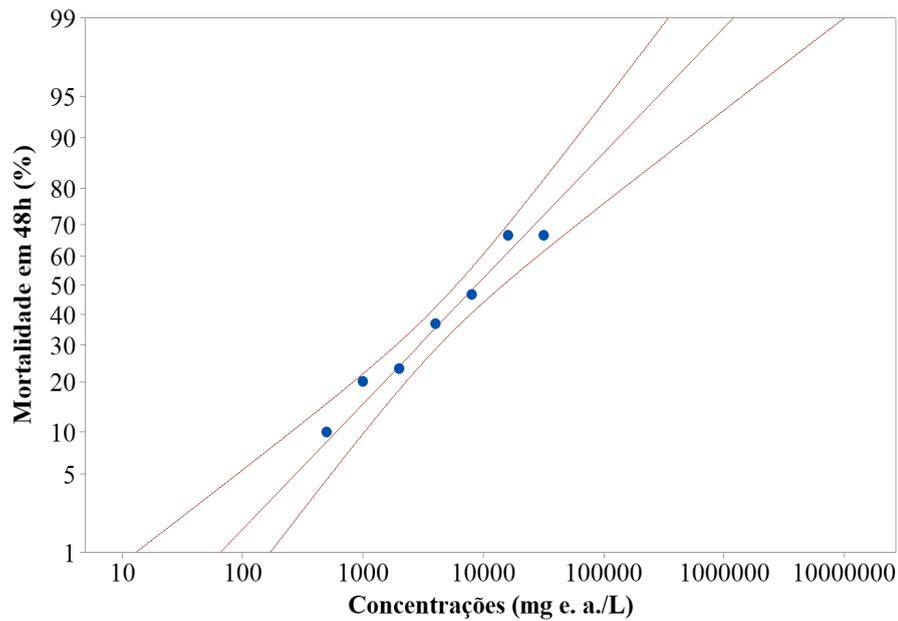
b)



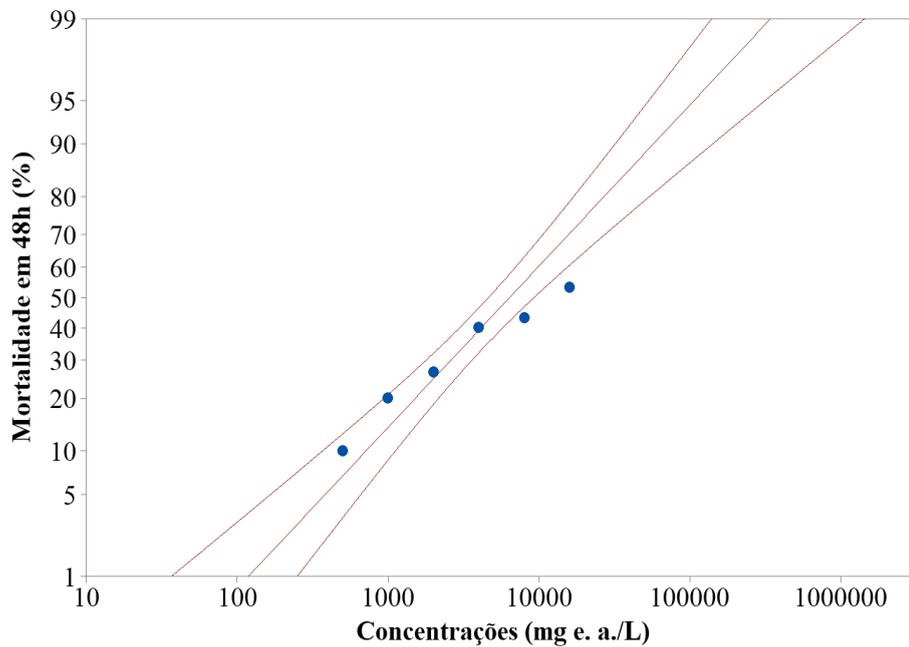
Pocco[®] revelou uma CL_{50} de 8.898,980 mg e.a./L para a exposição tópica (Figura 4a) e 6.424,700 mg e.a./L para a residual (Figura 4 b), demonstrando maior toxicidade em comparação com o Glifosato P.A. e Pilarsato[®]. A CL_{10} foi de 595,530 mg e.a./L na exposição tópica (Figura 4 a) e 715,124 mg e.a./L na residual (Figura 4b), indicando toxicidade superior em relação ao Glifosato P.A. e Pilarsato[®]. Estes dados são visualizados nos gráficos das Figuras 4a e 4b.

Figura 4 - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tópico(a) e residual(b) expostas em um período de 48 horas ao produto Pocco[®]. Análise por Probit: Mortalidade; Observações versus Concentrações (mg/L)

a)



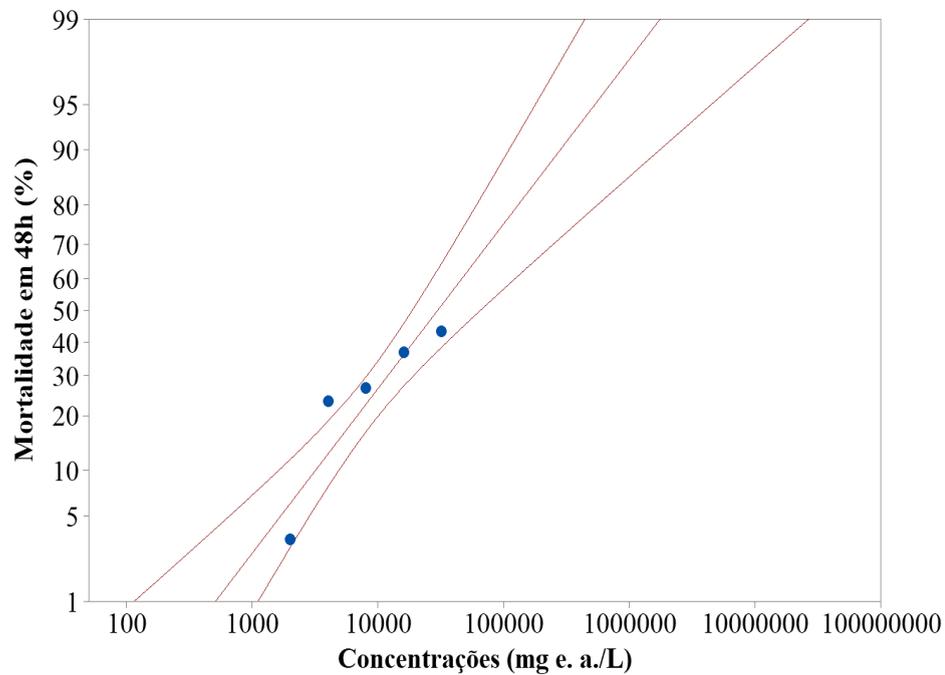
b)



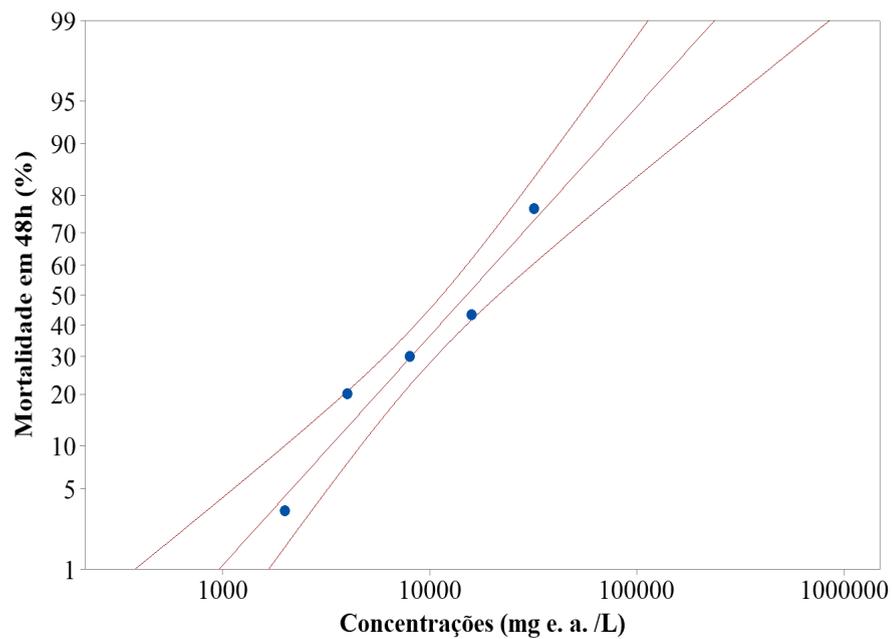
Finalmente, o Templo[®] apresentou uma CL_{50} de 29.955,000 mg e.a./L para a exposição tópica (Figura 5a) e 15.182,900 mg e.a./L para a exposição residual (Figura 5b). A CL_{10} foi de 3.182,27 mg e.a./L para a exposição tópica (Figura 5a) e 3.329,97 mg e.a./L para a exposição residual (Figura 5b). Os valores correspondentes estão ilustrados na figura a seguir.

Figura 5 - Mortalidade de abelhas *T. angustula* em exposição de efeito tóxico(a) e residual(b) expostas em um período de 48 horas ao produto Templo[®]. Análise por Probit: Mortalidade; Observações versus Concentrações (mg/L)

a)



b)



Em resumo, Glyphotal TR[®] mostrou ser o produto mais tóxico em comparação

com os demais, enquanto Glifosato P.A. foi o menos tóxico em todos os testes. Pocco® e Pilarsato® apresentaram níveis intermediários de toxicidade, e o Templo® demonstrou maior toxicidade em testes residuais do que em testes tópicos. Os dados apresentados podem ser encontrados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de CL₁₀ e CL₅₀ para Toxicidade Aguda de Glifosato P.A. e Herbicidas Comerciais em *T. angustula*.

| EAT | | | | | EAR | | | |
|-----------------|-------------------------------|-------------|---------|---------|-------------------------------|-------------|---------|---------|
| Composto | Cl ₅₀ (mMg e.a./L) | Erro Padrão | LI | LS | Cl ₅₀ (mMg e.a./L) | Erro Padrão | LI | LS |
| Glifosato P.A.* | 58355,900 | 75196,8 | 47093,1 | 34053,8 | 58355,900 | 30426,5 | 26836 | 285874 |
| Glyphotal TR® | 9801,760 | 229,53 | 6551,02 | 16716,9 | 4136,940 | 593,708 | 3124,76 | 5561,56 |
| Pilarsato® | 13332,300 | 3336,77 | 8671,14 | 24498,3 | 945,494 | 1723,35 | 6446,01 | 13954,4 |
| Pocco® | 8898,980 | 1944,81 | 6012,69 | 14742,7 | 6424,700 | 1103,53 | 4659,43 | 9340,73 |
| Templo® | 29955,000 | 8722,13 | 18779,4 | 65703,1 | 15182,900 | 2320,59 | 11532 | 21620,9 |

*mg/L. LI = Limite Inferior; LS = Limite Superior. Cl₅₀ = Concentração que mata 50% dos organismos. EAT=Efeito Agudo Tópico. EAR= Efeito Agudo Residual

Os resultados da análise de preferência alimentar para diferentes compostos à base de Glifosato variaram conforme o tipo de composto testado. O Glifosato P.A. demonstrou a menor CENO de 500 mg e.a./L e uma CEO de 1000 mg e.a./L ($F_{8,18} = 21,39$; $P < 0,001$; Figura 6a). Esses resultados indicam que este composto é o mais tóxico para as abelhas em comparação com os outros produtos testados. O Glyphotal TR® apresentou uma CENO de 2000 mg e.a./L e uma CEO de 4000 mg e.a./L ($F_{8,18} = 2,66$; $P < 0,05$; Figura 6b). O Pilarsato® mostrou uma CENO de 1600 mg e.a./L e uma CEO de 32000 mg e.a./L ($F_{8,18} = 2,98$; $P < 0,05$; Figura 6c). O Pocco® teve uma CENO de 2000 mg e.a./L e uma CEO de 4000 mg e.a./L ($F_{8,18} = 3,89$; $P < 0,01$; Figura 6d). Por fim, o Templo® apresentou a maior CENO de 4000 mg e.a./L e uma CEO de 8000 mg e.a./L ($F_{8,18} = 2,77$; $P < 0,05$; Figura 6e).

O Glifosato P.A. apresentou o menor valor de CEO, de 1000 mg e.a./L, sugerindo que este composto é o mais tóxico entre os testados, afetando a preferência alimentar das abelhas já em concentrações relativamente baixas. Em contraste, compostos com valores de CEO mais elevados, como o Pilarsato® (32000 mg e.a./L) e o

Templo® (8000 mg e.a./L), mostram que a toxicidade sobre a preferência alimentar ocorre apenas em concentrações mais altas, indicando menor toxicidade em comparação com o Glifosato P.A.

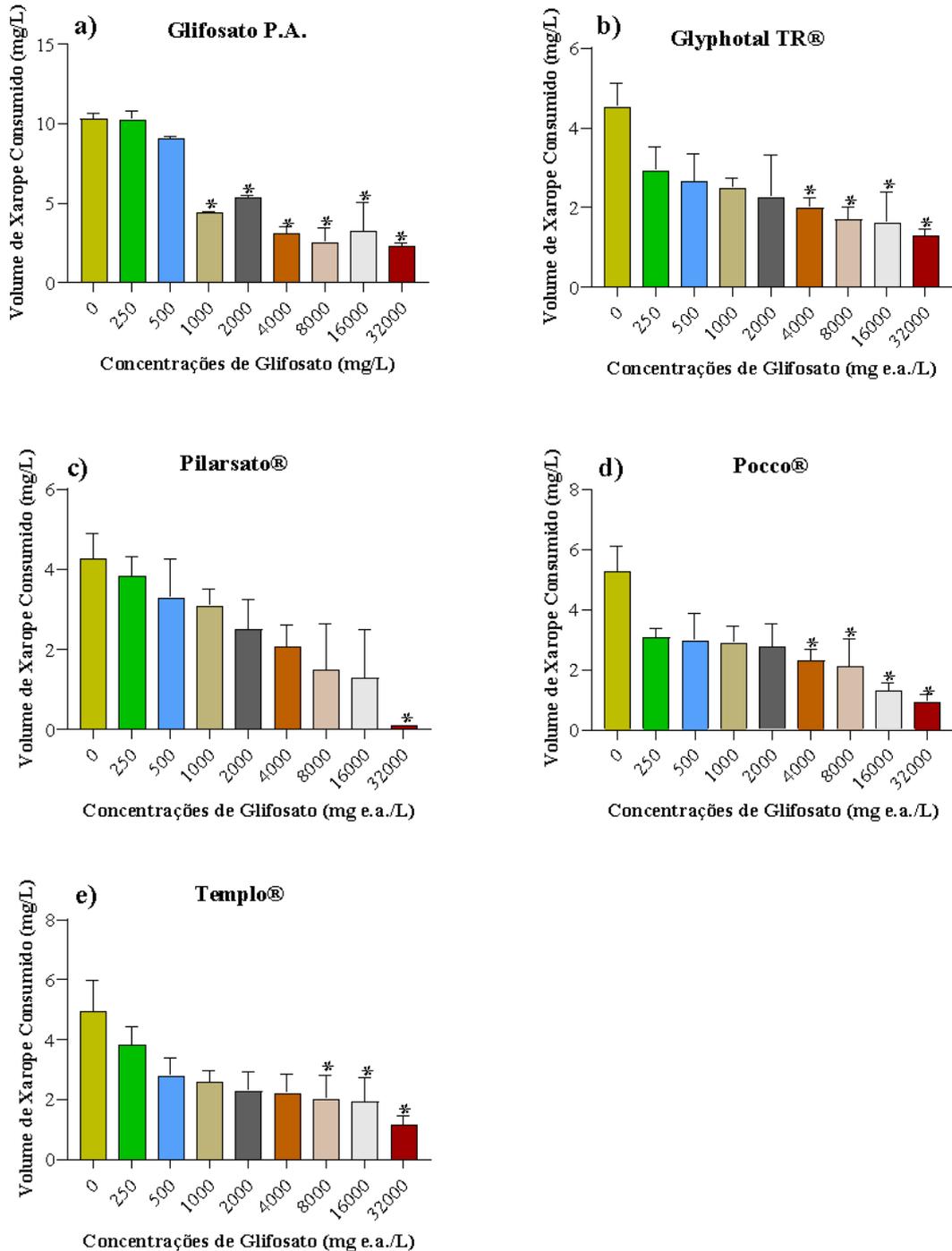


Figura 6 - Ecotoxicidade de Glifosato P.A. (a), Glyphotal TR® (b), Pilarsato® (c), Pocco® (d), e Templo® (e) sobre a preferência alimentar de *T. angustula* após 24 horas de exposição. Os dados são apresentados como média \pm erro padrão da média.

*Diferença significativa é observada em comparação com o tratamento controle (teste post hoc de Dunnett).

6 - Discussão

Os resultados obtidos revelaram que o produto Pocco[®] foi o mais tóxico em testes tópicos, enquanto o Pilarsato[®] causou a maior letalidade em testes residuais. Essa diferença pode ser atribuída à natureza dos dois tipos de ensaios. Testes residuais geralmente demonstram níveis mais elevados de toxicidade do que os testes tópicos, pois simulam a exposição prolongada aos resíduos dos compostos químicos (Oliveira *et al.*, 2023). Essa exposição contínua e o acúmulo de produtos no ambiente podem levar a toxicidade mais pronunciada, que os testes tópicos, que avaliam após uma única aplicação. Estudos anteriores confirmam que a exposição prolongada pode resultar em toxicidade mais acentuada (Zhang *et al.*, 2023).

O Glifosato P.A., com as maiores CL₅₀ e menores CL₁₀ em ambos os tipos de exposição, demonstrou ser o menos tóxico comparado aos demais. Em contraste, o Glyphotal TR[®] apresentou uma CL₅₀ reduzida e uma CL₁₀ mais baixa do que o Glifosato P.A. em testes tópicos. O Pilarsato[®] mostrou valores intermediários de CL₁₀ e CL₅₀, situando-se entre o Glyphotal TR[®] e o Pocco[®], sugerindo toxicidade significativa, porém inferior ao Glyphotal TR[®]. O Pocco[®] destacou-se como o mais tóxico, com as menores CL₁₀ e CL₅₀, especialmente em exposição tópica, e reforça a alta letalidade. O Templo[®] apresentou uma toxicidade mais pronunciada em testes residuais do que em tópicos, demonstrando que a exposição prolongada pode intensificar seus efeitos, no entanto, entre os produtos comerciais, foi menos tóxico. Essas observações destacam a importância de considerar o tipo de exposição e, também a formulação do herbicida para avaliar adequadamente seu impacto ambiental.

Quando comparado com os dados disponíveis para outras espécies de abelhas, as diferenças na sensibilidade são evidentes. Motta e Moran (2022) reportaram CL₅₀ para a formulação Roundup[®] de 16.91 mg/L e 169.1 mg/L por alimentação, e valores ainda menores para exposição tópica, variando de 2.7×10^3 mg/L a 1.62×10^4 mg/L. Em comparação, Luo *et al.* (2021) observaram CL₅₀ de 3.6 mg/L e 7.2 mg/L para a mesma formulação por alimentação, e Ma *et al.* (2024) relataram valor de 35 mg/L. Esses valores são substancialmente menores do que os encontrados para *T. angustula*, sugerindo, entre outros fatores que *Apis mellifera* pode ser mais sensível ao Glifosato.

O estudo de Rosa *et al.* (2024) para *Apis mellifera* encontrou uma CL_{50} de 54.86 mg/abelha para a formulação Roundup[®], que também é menor do que a CL_{50} observada para *T. angustula* em todos os testes. No entanto, testes com a mesma espécie também podem apresentar valores diferentes. Em testes com Roundup[®] um Sal de Di-amônio de N-(phosphonomethyl)glycine (37% e. a.) utilizando a espécie *T. angustula*, foram encontrados os valores de $CL_{10} = 0.016 \mu\text{g}/\text{bee}$ e $CL_{50} = 0.026 \mu\text{g}/\text{bee}$ (Prado *et al.*, 2022). Estes resultados são bem menores do que os encontrados com os produtos Pocco[®] (35,6% e. a.), Glyphotal[®] (48% e. a.), Pilarsato[®](36% e.a.), ambos sais de isopropilamina de N-(fosfonometil) glicina e Templo[®](54% e.a.), um sal de potássio (N-[(hydroxyphosphinato)methyl]glycine). Essas diferenças de sensibilidade podem ser atribuídas a variações na fisiologia, comportamento e métodos de exposição utilizados entre os autores, além da composição do produto.

É fundamental ressaltar a possível variabilidade biológica entre os indivíduos testados, provenientes de diferentes colônias. Cada colônia pode apresentar características e hábitos próprios, influenciados por fatores como genética, ambiente e estrutura social (Sommaroiva *et al.*, 2022). Essa diversidade genética e ambiental entre indivíduos e colônias pode influenciar consideravelmente as respostas ao estresse e à exposição a substâncias químicas. Estudos recentes sugerem que tal variabilidade é essencial para uma avaliação mais representativa e precisa dos efeitos ecotoxicológicos, uma vez que respostas divergentes a pesticidas e outros estressores podem ser atribuídas a essas diferenças (Themudo *et al.*, 2020). A variabilidade entre colônias pode impactar significativamente os resultados de testes ecotoxicológicos, especialmente quando se trata da exposição a compostos químicos como o Glifosato (Silva *et al.*, 2016). Diferenças genéticas e ambientais entre colônias podem levar a variações nas respostas imunológicas e metabólicas, influenciando como os indivíduos reagem a níveis iguais de exposição (Ma *et al.*, 2023). Essa variabilidade genética pode resultar em ampla gama de respostas tóxicas, refletindo a heterogeneidade observada nos resultados dos testes ecotoxicológicos (Castelli *et al.*, 2021).

Essa variabilidade é uma característica comum em estudos com organismos vivos e pode refletir diferenças individuais na sensibilidade aos compostos, bem como variações nos métodos de exposição e nas condições experimentais (Alcántara-de la Cruz *et al.*, 2021). A ingestão contínua de pequenas quantidades de contaminantes pode levar ao acúmulo e a efeitos adversos significativos, que afetam a saúde das abelhas e a dinâmica populacional (Cham *et al.*, 2019). Embora as concentrações dos compostos

testados tenham mostrado, em boa parte, pouco efeito letal imediato, é fundamental considerar que os testes realizados abordam os efeitos a curto prazo (24h-48h). Para uma avaliação mais complexa dos riscos do Glifosato e seus compostos ao ecossistema de *T. angustula*, é necessário considerar também os efeitos a longo prazo (Niu *et al.*, 2023). Em concentrações ambientalmente relevantes, o Glifosato pode causar impactos subletais que se manifestam ao longo do tempo, incluindo alterações no comportamento forrageiro, desenvolvimento larval e funções fisiológicas essenciais (Herbert *et al.*, 2014; Balbuena *et al.*, 2015; Tan *et al.*, 2022; Motta *et al.*, 2018). Esses efeitos subletais podem comprometer a capacidade das abelhas de sobreviver e prosperar, resultando em consequências ecológicas significativas para as populações de abelhas nativas e a biodiversidade (Thompson *et al.*, 2022).

Os efeitos subletais dos herbicidas em abelhas podem ter consequências significativas para a saúde e sobrevivência. Alterações no comportamento alimentar, como a redução da eficiência na busca e consumo de néctar e pólen, podem ser observadas pela interferência dos herbicidas na percepção sensorial das abelhas (Motta & Moran, 2023; Zioga, White, & Stout, 2022). Estudos mostram que a exposição a herbicidas como o Glifosato pode comprometer a capacidade das abelhas de distinguir entre diferentes fontes de alimento, além de reduzir o apetite, levando a uma dieta inadequada (Vázquez *et al.*, 2023). Esse impacto na nutrição enfraquece a saúde das abelhas e as torna mais vulneráveis a doenças e estresses ambientais (Ma *et al.*, 2024).

A capacidade de locomoção das abelhas também pode ser prejudicada, resultando em desorientação e dificuldades na navegação (Thompson *et al.*, 2022). Isso pode reduzir a eficiência do forrageamento e a capacidade das abelhas de retornar ao ninho, afetando a coleta de alimentos e a transferência de pólen (Farina *et al.*, 2019). A diminuição da atividade de forrageamento e o impacto na locomoção podem comprometer a sobrevivência individual e a saúde da colônia, prejudicando a produtividade geral e a manutenção da colônia (Ma *et al.*, 2024).

Os resultados da análise de preferência alimentar em *T. angustula* mostraram que o Glifosato P.A. apresentou a maior toxicidade entre os compostos testados, com uma CENO de 500 mg e.a./L e uma CEO de 1000 mg e.a./L (Figura 6). Outros produtos, como Pilarsato® e Templo®, tiveram CENOs e CEOs mais elevados, indicando menor toxicidade em comparação com o Glifosato P.A. (Figura 6).

O resultado da análise de preferência alimentar evidencia diferenças na toxicidade dos compostos de Glifosato testados em *T. angustula*. O Glifosato P.A.

apresentou elevada toxicidade, afetando as abelhas em concentrações significativamente menores, em comparação com outros produtos. Estas descobertas sugerem que mesmo exposições a baixas concentrações de Glifosato P.A. podem ter impactos adversos imediatos na alimentação das abelhas. Em contraste, compostos como o Pilarsato[®] e o Templo[®] que apresentaram as maiores CEOs, indicando que são menos tóxicos e afetam a preferência alimentar, apenas em concentrações mais elevadas. É também preciso relembrar o fato de que a toxicidade dos compostos pode variar entre subespécies, portanto, é importante testar em diferentes espécies de abelhas para obter uma avaliação mais abrangente.

Assim, como nos EAT e EAR, os testes de preferência alimentar podem encontrar variações na literatura, tanto em relação a composto como espécie. Utilizando o produto Roundup[®] Rosa *et al.* (2022) observou que ingestão de xarope contaminado com Glifosato pelas abelhas *Apis mellifera* diminui a partir de 0,92 mg e.a. por abelha, um valor abaixo do encontrado nos compostos testados, e que também é encontrado em muitos cenários naturais.

O Glifosato também pode influenciar o comportamento de forrageamento e a navegação das abelhas, sugerindo mais impacto negativo na polinização (Herbert *et al.*, 2014; Balbuena *et al.*, 2015). A exposição prolongada pode prejudicar a memória das abelhas, afetando a capacidade de associar estímulos com recompensas (Luo *et al.*, 2021). Trata-se de um herbicida amplamente utilizado que atua inibindo a via do shikimato, essencial para a biossíntese de aminoácidos aromáticos nas plantas (Ruszkowski; Forlani, 2022). Embora essa via não esteja presente em abelhas, o impacto indireto sobre esses insetos pode ser significativo. O Glifosato pode afetar a saúde das abelhas ao alterar os processos fisiológicos e metabólicos fundamentais, como demonstrado por Balbuena *et al.* (2015). Estudos mostraram que a exposição a Glifosato pode aumentar o estresse oxidativo em abelhas, prejudicando seus sistemas antioxidantes e, conseqüentemente, a capacidade de lidar com estressores ambientais (Jannike Lea Krause *et al.*, 2020).

A exposição ao Glifosato também pode modificar a microbiota intestinal das abelhas, afetando negativamente a digestão e a absorção de nutrientes essenciais. Niu *et al.* (2023) relataram que o desequilíbrio na microbiota intestinal pode levar a problemas de saúde e redução na eficiência alimentar das abelhas. A disbiose intestinal resultante pode comprometer o comportamento de forrageamento e a capacidade de navegação das abelhas (Luo *et al.*, 2021).

A exposição prolongada a Glifosato também tem mostrado efeitos adversos na memória e na capacidade de aprendizagem das abelhas. Herbert *et al.* (2014) e Balbuena *et al.* (2015) discutem como o Glifosato prejudica a formação de memórias associativas, fundamentais para a navegação e a busca de alimento. Essas alterações podem levar ao aumento no tempo necessário para que as abelhas retornem à colônia, impactando a eficiência do forrageamento e a sobrevivência das colônias.

Para *T. angustula*, a exposição a Glifosato pode resultar em efeitos negativos semelhantes, comprometendo a reprodução e o comportamento alimentar (Prado *et al.*, 2023). Estudos indicam que herbicidas podem interferir na fisiologia das abelhas, afetando não apenas o forrageamento, mas, a saúde geral e a produtividade das colônias (Castelli *et al.*, 2021). Logo, a redução na eficiência da navegação e forrageamento pode afetar diretamente a sobrevivência e o sucesso das colônias. Pesquisas adicionais são essenciais para entender melhor os impactos prolongados e obter uma visão mais completa dos riscos associados a estes compostos.

As condições experimentais e o histórico de exposição dos organismos influenciam diretamente a obtenção de resultados em estudos ecotoxicológicos. Fatores como temperatura, umidade e a presença de recursos no ambiente experimental podem afetar a resposta das abelhas ao Glifosato (Lopes *et al.*, 2018; Zioga *et al.*, 2022). Experimentos que não controlam adequadamente essas variáveis podem gerar dados que não refletem a realidade dos ambientes naturais (Biscassi *et al.*, 2024). Além disso, a exposição prolongada a doses subletais de Glifosato pode ter efeitos diferentes da exposição aguda, e essas distinções precisam ser cuidadosamente avaliadas (Shaara *et al.*, 2019). O histórico de exposição das abelhas a outros estressores ambientais também é crucial para entender os resultados, pois organismos previamente expostos podem apresentar respostas alteradas ao Glifosato devido a efeitos de sinergia ou potencialização de danos (Motta; Powell; Moran, 2022). Portanto, para que os resultados sejam representativos e aplicáveis ao ambiente real, os estudos ecotoxicológicos devem considerar tanto a variabilidade biológica quanto as condições experimentais (Agatz *et al.*, 2023).

Os valores obtidos para CL_{50} e CL_{10} na presente pesquisa revelam diferenças significativas quando comparados com as concentrações ambientalmente relevantes reportadas na literatura. O Glifosato P.A. apresentou os maiores valores de CL_{50} , com 58.355,900 mg/L para EAR e 110775 para EAT, o que indica que este produto tem a menor toxicidade entre os compostos testados. Esses valores são consideravelmente

superiores à concentração de 282,05 mg/L encontrada por Odemer *et al.* (2020). Sugerindo que o Glifosato P.A. possui valores de concentrações letais maiores que a ambientalmente relevante encontrada, indicando menor toxicidade.

Comparativamente, o Glyphotal TR[®] e o Pocco[®] mostraram toxicidade mais elevada, pois apresentaram valores de CL₅₀ menores em comparação com o Glifosato P.A. Esses compostos exigem concentrações menores para causar efeitos letais, indicando maior toxicidade, no entanto, os valores encontrados são maiores que as concentrações ambientalmente relevantes. Além disso, os valores de CL₁₀ para Glyphotal TR[®] e Pocco[®] também são menores, reforçando a ideia que esses produtos têm potencial de toxicidade mais alto entre os testes, porém menores que os ambientalmente relevantes.

Essas diferenças podem estar relacionadas às formulações específicas e às condições experimentais dos testes, que podem não refletir completamente as condições de exposição ambiental. Em cenários reais, a concentração de Glifosato encontrada por Odemer *et al.* (2020) é uma referência a ser considerada, e os compostos com CL₅₀ e CL₁₀ mais baixos, como Glyphotal TR[®] e Pocco[®], podem representar risco maior para as abelhas do que o Glifosato P.A. Considerar esses fatores é fundamental para avaliar o impacto ecotoxicológico dos produtos.

Práticas agrícolas sustentáveis são fundamentais para proteger as populações de abelhas nativas, que são organismos fundamentais tanto para a biodiversidade quanto para economia agrícola. Implementar estratégias que reduzam o uso de pesticidas e priorizem a preservação de habitats naturais pode, um dia, amenizar os riscos para estes polinizadores essenciais (Vázquez *et al.*, 2023). Além disso, medidas como a rotação de culturas e o uso de práticas de cultivo que promovam a diversidade de plantas são recomendadas para manter a saúde dos ecossistemas e aumentar a resiliência das populações de abelhas (Thompson *et al.*, 2014). Estas abordagens precisam ser pensadas não apenas para a sustentabilidade ambiental, mas também para garantir a segurança alimentar e a estabilidade econômica, pois as abelhas nativas são responsáveis pela polinização de uma vasta gama de culturas agrícolas (Helander *et al.*, 2023).

A exposição prolongada e a formulação dos produtos influenciaram a toxicidade, evidenciada pelos testes residuais e tópicos. Além da mortalidade, o Glifosato pode causar efeitos como alterações na preferência alimentar, comprometendo a saúde e a sobrevivência das abelhas. A variabilidade biológica e as condições experimentais

influenciam os resultados, destacando a necessidade de estudos mais aprofundados para avaliar os riscos associados ao uso de Glifosato, especialmente a longo prazo. Os resultados obtidos reforçam a importância de adotar práticas agrícolas conscientes, que sigam corretamente os protocolos de segurança, mas, também de implementar medidas de manejo e políticas públicas que minimizem os riscos para as populações de abelhas nativas, considerando a relevância ecológica e econômica desses polinizadores.

7 - Conclusão

Os resultados dos testes de toxicidade aguda em *T. angustula* revelaram variações entre as formulações de Glifosato e os tipos de exposição. O Glifosato P.A. foi o menos tóxico, com CL_{50} de 58.355,900 mg/L para ambos os tipos de exposição e menor toxicidade também em termos de CL_{10} . O Glyphotal TR[®] foi o mais tóxico, com CL_{50} de 9.801,760 mg e.a./L (tópica) e 4.136,940 mg e.a./L (residual). O Pilarsato[®] e o Pocco[®] apresentaram toxicidades intermediárias, e o Templo[®] mostrou maior toxicidade em testes residuais. Na preferência alimentar, o Glifosato P.A. foi o mais tóxico, com CEO de 1000 mg e.a./L, enquanto Pilarsato[®] e Templo[®] apresentaram menor toxicidade em concentrações mais altas. Estes resultados destacam a necessidade de avaliar tanto a toxicidade aguda quanto os efeitos subletais das diferentes formulações de Glifosato para *T. angustula*. Esses achados contribuem para a ciência ao fornecer dados sobre a toxicidade comparativa de diferentes formulações de Glifosato em *T. angustula*, fornecendo dados que poderão contribuir com a avaliação de riscos ambientais e auxiliando no desenvolvimento de estratégias para mitigar impactos negativos de herbicidas à base de Glifosato sobre abelhas nativas.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGATZ, A. et al. Evaluating and Explaining the Variability of Honey Bee Field Studies across Europe Using BEEHAVE. **Environmental toxicology and chemistry**, v. 42, n. 8, p. 1839–1850, 21 jun. 2023.
- ALCÁNTARA-DE LA CRUZ, R. et al. Glyphosate ban in Mexico: potential impacts on agriculture and weed management. **Pest Management Science**, v. 77, n. 9, p. 3820–3831, 1 set. 2021.
- ANETA BOKŠOVÁ et al. Effect of glyphosate on the foraging activity of European honey bees (*Apis mellifera L.*). **Plant Soil and Environment**, v. 69, n. 5, p. 195–201, 31 maio 2023.
- BALBUENA, M. S. et al. Effects of sublethal doses of glyphosate on honeybee navigation. **Journal of Experimental Biology**, v. 218, n. 17, p. 2799–2805, 1 set. 2015.
- CASTELLI, L. et al. Impact of Chronic Exposure to Sublethal Doses of Glyphosate on Honey Bee Immunity, Gut Microbiota and Infection by Pathogens. **Microorganisms**, v. 9, n. 4, p. 845, 15 abr. 2021.
- CHAM, K. O. et al. Pesticide Exposure Assessment Paradigm for Stingless Bees. **Environmental Entomology**. 2019.
- FARINA, W. M. et al. Effects of the Herbicide Glyphosate on Honey Bee Sensory and Cognitive Abilities: Individual Impairments with Implications for the Hive. **Insects**, v. 10, n. 10, p. 354, 18 out. 2019.
- FERREIRA, M. F. et al. Glyphosate affects the susceptibility of non-target native plant species according to their stage of development and degree of exposure in the landscape. **Science of the Total Environment**, v. 865, 20 mar. 2023.
- GANDHI, K. et al. Exposure risk and environmental impacts of glyphosate: Highlights on the toxicity of herbicide co-formulants. **Environmental Challenges B.V.**, , 1 ago. 2021.
- HELANDER, M. et al. Field-realistic acute exposure to glyphosate-based herbicide impairs fine-color discrimination in bumblebees. **Science of the Total Environment**, v. 857, 2023.
- HERBERT, L. T. et al. Effects of field-realistic doses of glyphosate on honeybee appetitive behavior. **The Journal of experimental biology**, v. 217, n. Pt 19, p. 3457–64, 2014.
- JANNIKE LEA KRAUSE et al. The glyphosate formulation Roundup® LB plus

influences the global metabolome of pig gut microbiota in vitro. **Science of The Total Environment**, v. 745, p. 140932–140932, 1 nov. 2020.

JACOB, C. R. DE O. *et al.* The impact of four widely used neonicotinoid insecticides on *Tetragonisca angustula* (Latreille) (Hymenoptera: Apidae). **Chemosphere**, v. 224, p. 65–70, 1 jun. 2019.

LOPES, C. V. A.; ALBUQUERQUE, G. S. C. DE. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde em Debate**, v. 42, n. 117, p. 518–534, jun. 2018.

LUO, Q.-H. *et al.* Effects of a commercially formulated glyphosate solutions at recommended concentrations on honeybee (*Apis mellifera* L.) behaviours. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 22 jan. 2021.

MA, M. *et al.* Isolation of carboxylesterase (esterase FE4) from *Apis cerana cerana* and its role in oxidative resistance during adverse environmental stress. **Biochimie**, v. 144, 2018.

MA, C. *et al.* Impact of chronic exposure to field level glyphosate on the food consumption, survival, gene expression, gut microbiota, and metabolomic profiles of honeybees. **Environmental research**, v. 250, p. 118509–118509, 1 jun. 2024.

MOTTA, E. V. S.; MORAN, N. A. The effects of glyphosate, pure or in herbicide formulation, on bumble bees and their gut microbial communities. **Science of the Total Environment**, v. 872, 10 maio 2023.

MOTTA, E. V. S.; POWELL, J. E.; MORAN, N. A. Glyphosate induces immune dysregulation in honey bees. **Animal Microbiome**, v. 4, n. 1, 22 fev. 2022.

NIU, X. J. *et al.* Fox transcription factor AccGRF1 in response to glyphosate stress in *Apis cerana cerana*. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 192, 1 maio 2023.

ODEMER, R. *et al.* Chronic high glyphosate exposure delays individual worker bee (*Apis mellifera* L.) development under field conditions. **Insects**, v. 11, n. 10, 2020.

OECD. Guidance document on aquatic toxicity testing of difficult substances and mixtures. **Environmental Health and Safety Publications, Series on Testing and Assessment - N°23**, n. 23, 2000.

OLIVEIRA, A. A. *et al.* Toxicity of imidacloprid for stingless bees of the genus *Tetragonisca* (Meliponini). **Apidologie**, v. 54, n. 6, 1 dez. 2023.

OLIVEIRA, A. A. *et al.* Captura e manejo de abelhas nativas sem ferrão: um guia técnico de captura e manutenção de colônias para uso em ensaios laboratoriais e educacionais. **Entomology Beginners**, v. 4, 2023.

PRADO et al. Glyphosate affects *Tetragonisca angustula* (Latreille, 1811) (Hymenoptera: Apidae) worker's locomotion, behavior and biology. **Research Square (Research Square)**, 10 out. 2022.

PRADO, I. S. et al. Glyphosate-based formulation affects *Tetragonisca angustula* worker's locomotion, behavior and biology. **Ecotoxicology**, v. 32, n. 4, 2023.

SAMANTH, A. et al. Efficient adsorptive removal of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) using biomass derived magnetic activated carbon nanocomposite in synthetic and simulated agricultural runoff water. **Chemosphere**, v. 361, 1 ago. 2024.

SHAARA, H. F.; ABUZEID, M. A. Effects of two herbicides on healthy and Nosema infected honey bee workers IAEES Publications. **Art hropods**, 2019.

SILVA, B. S. et al. Efeitos do imidacloprido sobre o comportamento das abelhas *Scaptotrigona postica* Latreille, 1807 (Hymenoptera, Apidae). **Revista ciência, tecnologia & ambiente**, v. 3, 2016.

SOMMAROIVA, M. M.; RIBEIRO, M. F.; PEREIRA, R. A. P. Variability in behavior and ecology of *Tetragonisca angustula* colonies. **Journal of Apicultural Research**, v. 61, n. 1, p. 43-51, 2022.

RUSZKOWSKI, M.; FORLANI, G. Deciphering the structure of *Arabidopsis thaliana* 5-enol-pyruvyl-shikimate-3-phosphate synthase: An essential step toward the discovery of novel inhibitors to supersede glyphosate. **Computational and Structural Biotechnology Journal**, v. 20, p. 1494–1505, 1 jan. 2022.

TAN, S. et al. Effects of glyphosate exposure on honeybees. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, 2022.

THEMUDO, G. et al. Declining genetic diversity of European honeybees along the twentieth century. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 29 jun. 2020.

THOMPSON, L. J. et al. Bumblebees can be Exposed to the Herbicide Glyphosate when Foraging. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 41, n. 10, 2022.

VÁZQUEZ, D. E. et al. Chronic exposure to glyphosate induces transcriptional changes in honey bee larva: A toxicogenomic study. **Environmental Pollution**, v. 261, 1 jun. 2020.

ZHANG, G.; OLSSON, R. L.; HOPKINS, B. K. Strategies and techniques to mitigate the negative impacts of pesticide exposure to honey bees. **Environmental Pollution**, 2023.

ZIOGA, E.; WHITE, B.; STOUT, J. C. Glyphosate used as desiccant contaminates plant pollen and nectar of non-target plant species. **Heliyon**, v. 8, n. 12, 1 dez. 2022.