

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 23/07/2027.

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGIA CELULAR, MOLECULAR E MICROBIOLOGIA)**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA EXPOSIÇÃO AOS AGROTÓXICOS MANCOZEBE E
CLORPIRIFÓS EM ABELHA NATIVA *Scaptotrigona postica* Latreille, 1807
(HYMENOPTERA: APIDAE)**

RAFAELA CAMARGO ABDALLA VIEIRA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGIA CELULAR, MOLECULAR E MICROBIOLOGIA)**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA EXPOSIÇÃO AOS AGROTÓXICOS MANCOZEBE E
CLORPIRIFÓS EM ABELHA NATIVA *Scaptotrigona postica* Latreille, 1807
(HYMENOPTERA: APIDAE)**

RAFAELA CAMARGO ABDALLA VIEIRA

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas (Biologia Celular, Molecular e Microbiologia).

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Roberta Cornélio Ferreira Nocelli

Co-orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Tatiane Caroline Grella

V658a

Vieira, Rafaela Camargo Abdalla

Avaliação dos efeitos da exposição aos agrotóxicos mancozebe e clorpirifós em abelha nativa *Scaptotrigona postica* Latreille, 1807 (Hymenoptera: Apidae) / Rafaela Camargo Abdalla Vieira. -- Rio Claro, 2025

85 p. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Rio Claro

Orientadora: Roberta Cornélio Ferreira Nocelli

Coorientadora: Tatiane Caroline Grella

1. Abelha sem ferrão. 2. Morfologia. 3. Contagem total de hemócitos. 4. Ecotoxicologia. 5. Agrotóxicos. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA EXPOSIÇÃO AOS AGROTÓXICOS
MANCOZEBE E CLORPIRIFÓS EM ABELHA NATIVA *Scaptotrigona postica*
Latreille, 1807 (HYMENOPTERA: APIDAE)

AUTORA: RAFAELA CAMARGO ABDALLA VIEIRA

ORIENTADORA: ROBERTA CORNELIO FERREIRA NOCELLI

COORIENTADORA: TATIANE CAROLINE GRELLA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências Biológicas (Biologia Celular, Molecular e Microbiologia), área: Diversidade Biológica e Biologia Ambiental pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. ROBERTA CORNELIO FERREIRA NOCELLI (Participação Virtual)
Departamento de Ciencias da Natureza Matematica e Educacao - Centro de Ciências Agrárias / Universidade Federal de Sao Carlos - UFSCar / Araras - SP

Profa. Dra. ADNA SUELEN DORIGO (Participação Virtual)
Eurofins Agrosience Services

Profa. Dra. ANNE LISE DE SOUZA ROSA FONTANA (Participação Virtual)
Centro de Investigação de Montanha / Instituto Politécnico de Bragança - Portugal

Rio Claro, 23 de julho de 2025

Dedico este trabalho a todas as mulheres incríveis da minha vida que me ensinaram,
com palavras e silêncios, o significado de ter um coração inabalável.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em partes a mim, por não desistir, mesmo diante dos inúmeros obstáculos que marcaram a elaboração e a conclusão deste trabalho. Foram momentos difíceis e solitários. Situações de incertezas, mas que, de alguma forma, conseguiram moldar um pouco da experiência valiosa que hoje carrego comigo: perseverança. Nada é permanente, exceto a mudança. Os anos de 2024 e 2025 foram permeados de transformações poderosas, todas com provações mais que bem cumpridas. Sou grata!

À minha mãe, Stela Abdalla, pela força e motivação constantes, que sempre habitaram meu coração e me sustentaram ao longo desta aventura. Às minhas irmãs, Beatriz Abdalla, Keli Abdalla e Camila McHugh, pela confiança em mim desde os primeiros passos. Aos meus incríveis e talentosos sobrinhos, Ayla Abdalla, Theo Abdalla e Juliet H. McHugh, por serem os raios de alegria da minha vida. À minha avó, Maria do Carmo Abdalla, por existir neste mundo e me ensinar, com sua doçura, o valor inestimável da ternura e paciência. Ao meu avô, Acácio Abdalla (*in memoriam*), por tudo o que representa.

À Prof.^a Dr.^a Roberta Nocelli, minha querida e eterna professora, expresso profunda gratidão pela orientação ao longo dos anos de graduação e pós-graduação, e por ter me encorajado a seguir no caminho da ciência. À Dr.^a Tatiane Grella, pelo apoio contínuo desde o momento que pisei no laboratório pela primeira vez, e pela paciência em me escutar e guiar da melhor forma quando mais precisei. Ao Prof. Dr. Osmar Malaspina, pelas conversas, histórias e conselhos que tanto enriqueceram minha formação. Ao Prof. Dr. Elton Scudeler, por todo suporte oferecido no laboratório.

Ao meu amigo Me. Francisco Inácio, pela ajuda com as coletas de abelhas, conversas sinceras, risos e parceria. Sou igualmente grata aos meus amigos e colegas de laboratório, que contribuíram com as minhas ideias: Me. Lais Inoue, Me. Victor Sales e Dr. Geovanny Barroso. Ao meu amigo e parceiro Victor Neudo, que fez contribuições preciosas para este trabalho. À Seção Técnica de Pós-Graduação (STPG) do Programa de Biologia Celular, Molecular e Microbiologia (BCMM), em especial a Ivana Brandt e Felipe Guimarães.

Agradeço aos locais foram meu espaço de formação e dedicação: Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Rio Claro; Laboratório de Ecotoxicologia e Conservação de Abelhas (LECA); Centro de Estudos de Insetos Sociais (CEIS); Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) de Araras e ao grupo de pesquisa Abelhas e os Serviços Ambientais (ASAs). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Nada me deixa mais orgulhosa do que ter vencido cada etapa até aqui.

“No meio do inverno, aprendi enfim que havia em mim um verão invencível.”

— Albert Camus, *O Verão* (2020).

RESUMO GERAL

Os agrotóxicos são um dos principais fatores de mortalidade para as abelhas, levando ao enfraquecimento de suas populações. A diminuição dos serviços de polinização em ambientes naturais e cultivados, é responsável pela redução da biodiversidade e perda econômica em culturas dependentes, ou que se beneficiam desses serviços ecossistêmicos. Dada a importância dos ensaios ecotoxicológicos para a compreensão dos impactos dos agrotóxicos sobre abelhas, este estudo avaliou alterações morfológicas no intestino e nos túbulos de Malpighi, além de realizar a contagem total de hemócitos (CTH) em abelhas sem ferrão *Scaptotrigona postica*. As abelhas foram expostas, em vias oral e tópica, a valores residuais aproximados para culturas de café do fungicida mancozebe (MZ) e inseticida clorpirifós (CL). Dessa forma, indivíduos forrageiros e recém-emergidos foram expostos oralmente ao MZ (0.290 ng i.a./μL) e ao CL (0.647 ng i.a./μL), enquanto a exposição tópica foi realizada somente com abelhas forrageiras, com concentrações equivalentes a 1/10 das utilizadas para a exposição oral. A CTH foi realizada em abelhas forrageiras submetidas a via oral. Todas as análises ocorreram nos intervalos de 24, 48, 72 e 96 horas. No intestino, os resultados indicaram a perda de material citoplasmático, a perda da borda em escova, a eliminação de células para o lúmen, a perda de ninho de células regenerativas e a presença de células com núcleos picnóticos. Nos túbulos de Malpighi, foram avaliados alterações similares, incluindo o inchaço celular. As alterações morfológicas observadas variaram conforme o agrotóxico, a idade das abelhas, a via de exposição e o intervalo de horas em que os órgãos foram analisados. Embora a CTH não tenha apresentado diferença estatística significativa em relação ao controle, houve a tendência à redução de hemócitos livres após 96 horas de exposição ao MZ. Também houve um aumento inicial seguido de uma diminuição de hemócitos livres com a exposição ao CL. Os resultados obtidos indicam que *S. postica* é sensível aos valores dos agrotóxicos testados. Ademais, estudos com intervalos prolongados (> 96 h) são recomendados para avaliar a recuperação tecidual e outros efeitos crônicos em abelhas nativas, bem como bioensaios de curta duração (< 24h) para avaliar a CTH.

Palavras-chave: abelha sem ferrão, histologia, contagem total de hemócitos, inseticida, fungicida.

ABSTRACT

Pesticides are one of the main causes of bee mortality, leading to the weakening of their populations. The decline in pollination services in natural and cultivated environments is responsible for the reduction of biodiversity and economic loss in crops that depend on or benefit from these ecosystem services. Given the importance of ecotoxicological tests for understanding the impacts of pesticides on bees, this study evaluated morphological changes in the intestine and Malpighian tubules, in addition to performing a total hemocyte count (THC) in stingless bees *Scaptotrigona postica*. The bees were exposed, orally and topically, to approximate residual values for coffee crops of the fungicide mancozeb (MZ) and the insecticide chlorpyrifos (CL). Thus, foraging and newly emerged individuals were orally exposed to MZ (0.290 ng a.i./ μ L) and CL (0.647 ng a.i./ μ L), while topical exposure was performed only with foraging bees, with concentrations equivalent to 1/10 of the oral exposure. The THC was performed on foraging bees subjected to oral exposure. All analyses were performed at 24, 48, 72, and 96 hours. In the intestine, the results indicated loss of cytoplasmic material, loss of the brush border, elimination of cells into the lumen, loss of regenerative cell nests, and presence of cells with pyknotic nuclei. Similar changes, including cell swelling, were evaluated in the Malpighian tubules. The morphological changes observed varied according to the pesticide, the age of the bees, the route of exposure, and the time interval at which the organs were analyzed. Although THC did not show a statistically significant difference compared to the control, there was a tendency toward a reduction in free hemocytes after 96 hours of exposure to MZ. There was also an initial increase followed by a decrease in free hemocytes with exposure to CL. The results obtained indicate that *S. postica* is sensitive to the levels of the pesticides tested. Furthermore, studies with prolonged intervals (> 96 h) are recommended to assess tissue recovery and other chronic effects in native bees, as well as short-term bioassays (< 24 h) to assess THC.

Key-words: stingless bee, histology, total hemocyte count, insecticide, fungicide.

Title: EVALUATION OF THE EFFECTS OF EXPOSURE TO THE PESTICIDES MANCOZEB AND CHLORPYRIFOS ON THE NATIVE BEE *Scaptotrigona postica* Latreille, 1807 (HYMENOPTERA: APIDAE)

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BE – Borda em escova

B.O.D. – Demanda Bioquímica de Oxigênio

CL – Clorpirifós

CR – Controle

CR-AG – Controle água

CR-AC – Controle acetona

CTH – Contagem total de hemócitos

CDH – Contagem diferencial de hemócitos

ECL – Eliminação de células para o lúmen

HM – Hemolinfa

HC – Hemócitos

IN – Inchaço celular

L – Lúmen

MZ – Mancozebe

NCR – Ninho de células regenerativas

N – Núcleo celular

PBE – Perda de borda em escova

PIC – Picnose

PMC – Perda de material citoplasmático

PNCR – Perda de ninhos de células regenerativas

µm – Micrômetros

ng – Nanogramas

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
OBJETIVOS	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
CAPÍTULO 1	30
CAPÍTULO 2	67

INTRODUÇÃO GERAL

As interações planta-polinizador são responsáveis pela manutenção e biodiversidade das flores e importantes para fundamentar a história da biodiversidade e coevolução das espécies (Johnson & Anderson, 2010; Dötterl; Vereecken, 2010; Hung *et al.*, 2018; Papa *et al.*, 2022). Entre as interações, a polinização é um processo importante para a reprodução cruzada das plantas, ocorrendo quando a célula reprodutiva masculina, o pólen, produzida nas anteras das flores, é transferida para o receptor feminino, o estigma (Silveira *et al.*, 2006; Klein *et al.*, 2020).

A transferência pode acontecer na mesma flor, entre flores da mesma planta ou entre flores de plantas diferentes, porém da mesma espécie, mediadas por agentes polinizadores abióticos ou bióticos (Silveira *et al.*, 2006; Klein *et al.*, 2020). Para além da reprodução cruzada das espécies vegetais, a polinização também é responsável por um aumento na qualidade e quantidade das sementes e dos frutos (Ollerton *et al.*, 2011). Em mais de 70% das culturas globais, a polinização por insetos é benéfica para produtividade agrícola (Klein *et al.*, 2007).

O valor mundial dos serviços dos polinizadores é estimado entre US\$ 200 a 500 bilhões por ano, em que o Brasil representa aproximadamente US\$ 42 bilhões (Giannini *et al.*, 2015; IPBES, 2016). Oliveira e colaboradores (2024) discutem que a produção de soja no Brasil foi responsável por cerca de US\$ 32 bilhões do valor de serviços de polinização, seguidamente, as culturas de café com US\$ 3 bilhões, laranja e críticos com US\$ 1 bilhão, açaí com US\$ 738 milhões e cacau com US\$ 737 milhões.

As abelhas (Hymenoptera, Apidae) são reconhecidas por sua eficiência como agentes polinizadores bióticos (Klein *et al.*, 2007), também atuando como bioindicadores em regiões neotropicais (Meléndez *et al.*, 2018; Roubik, 2020). A relação entre coevolução de polinizadores e plantas com flores, estudada por autores como Johnson e Anderson (2010) e Dötterl e Vereecken (2010), indica a existência de uma seleção de diversas estruturas florais e respostas químicas ao longo dos anos para facilitar e atrair a polinização para as abelhas.

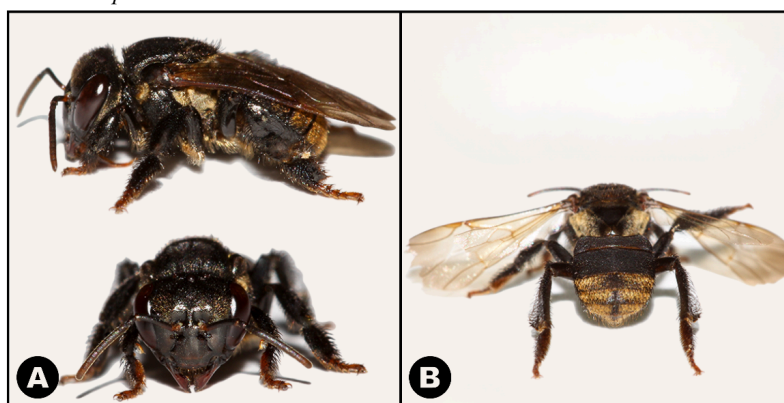
Entre a diversidade de abelhas, as abelhas sem ferrão (Hymenoptera, Apidae, Meliponini), também conhecidas como meliponíneos ou abelhas nativas, são polinizadoras da flora nativa e dos agroecossistemas, fator essencial para a segurança alimentar e a diversidade da produtividade econômica (Barbiéri & Franco, 2020). Diante da sua relevância para diferentes esferas, as abelhas podem contribuir com pelo menos 15 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS) (Patel *et al.*, 2021). Mesmo em

espécies vegetais que realizam autofecundação, a presença de polinizadores aumenta a produtividade das plantas cultivadas (Imperatriz-Fonseca; Nunes-Silva, 2010).

Autores como Engel e colaboradores (2023) estimam a existência de 600 espécies de abelhas sem ferrão identificadas no mundo, em regiões tropicais e subtropicais como Austrália, África, Sudoeste Asiático e América Latina. Atualmente, cerca de 500 espécies de meliponíneos são descritos na literatura somente para a América Latina (De Menezes, 2014; Souza *et al.*, 2021; Real-Luna *et al.*, 2022). As populações de abelhas nativas desempenham um papel fundamental nos serviços de polinização, podendo apresentar mais eficiência que a espécie introduzida africanizada *Apis mellifera* Latreille (1811) na produção e qualidade de culturas específicas (Lopes *et al.*, 2005; Garibaldi *et al.*, 2013; Pardo; Borges, 2020).

Entre a diversidade de abelhas nativas, a espécie *Scaptotrigona postica* Latreille (1807), conhecida popularmente como mandaguari preta ou abelha canudo, possui distribuição em diversos estados do Brasil e é uma polinizadora eficaz (figura 1), aumentando a produtividade de espécies vegetais de interesse econômico, como a gabioba (*Campomanesia pubescens*), juá-fruta (*Ziziphus joazeiro*), murta (*Blepharocalyx salicifolius*), umbu (*Spondias tuberosa*) e café (*Coffea arabica*) (BPBES, 2019; Campbell *et al.*, 2019; Muto *et al.*, 2020). Devido à sua tolerância a diferentes temperaturas, essa abelha tem potencial como polinizadora em estufas (*Greenhouses*) (Amano, 2004; Santos *et al.*, 2008; Roselino *et al.*, 2009; Bomfim *et al.*, 2014). Além disso, seu alto grau de forrageamento combinado a ausência de ferrão, as tornam abelhas de fácil manejo (Amano, 2004).

Figura 1. Espécie de abelha *S. postica*.



Legendas: (A) Morfologia externa lateral e frontal; (B) Morfologia externa posterior. **Fonte:** A.B.E.L.H.A, 2022.

As abelhas sem ferrão são responsáveis pela polinização de 40 a 90% da flora nativa, dependendo do bioma considerado (Kerr *et al.*, 1996; Witter *et al.*, 2014). As culturas de

cacau (*Theobroma cacao*), cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), urucum (*Bixa orellana*), açai (*Euterpe oleracea*), jabuticaba (*Plinia cauliflora*), caju (*Anacardium occidentale*), maracujá (*Passiflora edulis*), castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) e goiaba (*Psidium guajava*) (BPBES, 2019), por exemplo, são polinizadas por abelhas nativas. As abelhas sem ferrão também são excelentes polinizadoras de espécies exóticas cultivadas no país, entre elas o café (Thomas; Kevan, 2012; D'Avila; Marchini, 2013; Alves *et al.*, 2024), no qual o Brasil atualmente é líder mundial na produção e o segundo maior consumidor do mundo (GOV, 2023).

A polinização por abelhas em plantações de café no Brasil leva a um aumento de 28 a 30% na produção (Saturni *et al.*, 2016; Hipólito *et al.*, 2018). Pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente e da Syngenta Proteção de Cultivos no Brasil estimam um melhoramento de 16.5% na produtividade do café com a integração da polinização assistida por abelhas melíferas, um aumento no valor de cerca de 13% por saca (GOV, 2024). Autores como Klein e colaboradores (2008), avaliam que o valor de polinização em culturas brasileiras de café pode chegar a US\$ 1.9 bilhão.

O gênero *Scaptotrigona* é recomendado para polinização assistida em culturas de café (Brasil Agro, 2024; Alves *et al.*, 2024; Escobar-González *et al.*, 2024) por suas características cosmopolitas, populosas e de fácil manejo (Melo, 2019). O aumento da qualidade e quantidade dos grãos de *C. arabica* polinizado por abelhas *Scaptotrigona* manejadas também é estudado e observado em fazendas de café por Alves e colaboradores (2024). A contribuição da polinização por abelhas inclui a diminuição das taxas de abortamento, melhor taxa de amadurecimento e melhor qualidade dos frutos (AGROBEE, 2021).

Mesmo sendo um agente ecossistêmico de valor econômico elevado pelos seus recursos e serviços, o declínio das populações de abelhas está sendo documentado desde o século XX, e são atualmente reconhecidas várias causas, como perda de habitat, fragmentação de paisagens, doenças, mudanças climáticas e o uso indiscriminado de agrotóxicos (Carson, 1962; Kerr, 2001; Fanta *et al.*, 2021; Campbell *et al.*, 2022). A redução da população de polinizadores, além de ser um fator negativo para a biodiversidade e alimentação humana, resulta em perda econômica através do déficit de polinização (Hipólito *et al.*, 2016; Sheffield *et al.*, 2022).

O Brasil é um dos principais consumidores de agrotóxicos do mundo. Somente em 2023, o consumo aproximado foi de 700 mil toneladas (Paz *et al.*, 2023). Muitas culturas de importância alimentar e econômica sofrem com a existência das pragas e doenças e, para combater e controlar esses organismos, agrotóxicos isolados e combinados são utilizados em

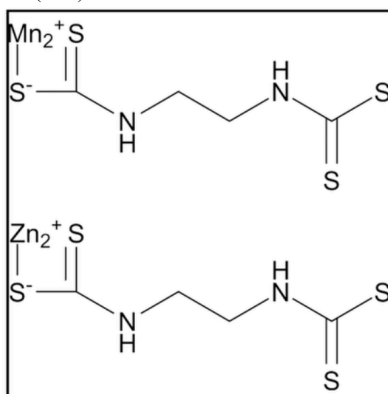
culturas alimentares, oferecendo riscos quanto aos valores utilizados, periculosidade da molécula e biodisponibilidade no ambiente após a aplicação (Hess *et al.*, 2021; dos Santos *et al.*, 2021; Pontin *et al.*, 2022).

A ferrugem do café *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome (1869) (Basidiomycota, Pucciniales) e o bicho-mineiro *Leucoptera coffeella* Guérin-Ménéville (1842) (Lepidoptera, Lyonetiidae), são as pragas de maior incidência na cultura do cafeeiro no Brasil (Conceição *et al.*, 2005). Entre os agrotóxicos utilizados e reconhecidos para combater não somente as pragas dos cafezais, como inúmeras de outras culturas, está o fungicida ditiocarbamato mancozebe (MZ) e o inseticida organofosforado clorpirifós (CL), dois agrotóxicos já encontrados na lista dos 10 ingredientes ativos mais comercializados no Brasil (IBAMA, 2023).

Em 2022, o MZ ocupava o 4º lugar da lista, com cerca de 41 toneladas vendidas. O CL ocupava o 8º lugar, com aproximadamente 17 toneladas. No ano de 2023, o MZ se tornou o 2º ingrediente ativo mais vendido no país, com cerca de 53 toneladas, enquanto o CL deixou a lista dos 10 agrotóxicos mais comercializados, registrando uma redução para aproximadamente 6 toneladas. Os estados do Mato Grosso e São Paulo são os principais responsáveis pelas vendas desses ativos (IBAMA, 2023; 2024). Estudos indicam que esses agrotóxicos geram efeitos letais e subletais em abelhas nativas, por meio de exposição oral ou tópica, sendo classificados como tóxicos, mesmo em concentrações residuais (Dorneles *et al.*, 2017; Dorneles *et al.*, 2021; Ramos, 2021).

Os ditiocarbamatos fazem parte do grupo dos etilenobisditiocarbamatos (EDBC) e possuem ação fungicida de contato, agindo como inibidores multi-sítio no patógeno (figura 2) (Gisi; Sierotzki, 2008). De acordo com Gullino e colaboradores (2010), o MZ é valorizado devido ao seu baixo custo e amplo espectro, comercializado desde 1956. Entretanto, apesar de sua utilização mundial, a regulação desse agrotóxico difere conforme o país. No final de 2020, a Comissão Europeia forneceu um comunicado informando que esse ativo não passaria pela renovação de uso, concedendo um prazo de dois anos para adequação dos produtores agrícolas às novas normas (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

Figura 2. Estrutura química do mancozebe (MZ).



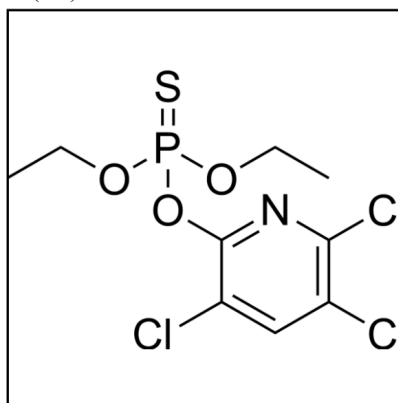
Fonte: MCE, 2024.

O MZ é degradado no ambiente para etilenotiureia (ETU), um produto contaminante que pode causar alterações morfológicas e fisiológicas em organismos não-alvo, como mudanças na tireoide, sendo classificado como um potencial carcinógeno humano (Dhaneshwar; Hardej, 2021; Costa *et al.*, 2022; Abdelkader *et al.*, 2023). Demais estudos indicam que o MZ também tem efeitos negativos sobre fungos simbiotes de raízes, impedindo a germinação de esporos mesmo em concentrações baixas (Giovannetti *et al.*, 2006).

Além da cultura do café, o MZ é utilizado em culturas de batata, tomate, citros, banana, alface, cebola, milho, manga e beterraba (Gullino *et al.*, 2010). A aplicação de grande parte dos fungicidas ocorre durante a fase de floração das plantas, que coincide com o período de forrageamento das abelhas (Johnson *et al.*, 2013). Dessa forma, relações prejudiciais entre a presença do MZ e as abelhas já foram descritas na literatura, como alteração na capacidade de voo, sobrevivência e peso larval (Dorneles *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2023; Porras *et al.*, 2024).

A classe dos organofosforados, como o CL, engloba inseticidas sistêmicos que atuam na inibição da enzima acetilcolinesterase (AChE), responsável por degradar o neurotransmissor acetilcolina, utilizado na comunicação entre os neurônios colinérgicos (figura 3). Ao inibir a AChE, o CL permite o acúmulo de acetilcolina nos terminais nervosos, levando à hiperestimulação dos neurônios, disfunções no sistema nervoso, paralisia e morte (Matsumura, 1985; Perry *et al.*, 2020). Apesar de sua introdução no mercado em 1965, o CL continua sendo utilizado no controle de pragas agrícolas de culturas de valor econômico, reconhecido pelo seu alto espectro biológico (George *et al.*, 2014).

Figura 3. Estrutura química do clorpirifós (CL).



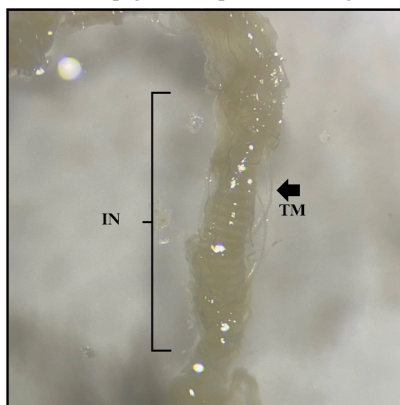
Fonte: MCE, 2024.

O CL é degradado no ambiente para produtos intermediários como o 3,5,6-tricloro-2-piridinol (TCP), molécula tóxica, com alta solubilidade em água e persistência no solo (Kumar *et al.*, 2023). Em organismos não-alvo, a exposição ao CL pode causar danos ao sistema nervoso, problemas respiratórios, distúrbios endócrinos e câncer (Lee *et al.*, 2004; Eaton *et al.*, 2008; Ventura *et al.*, 2019). Todavia, esse ativo continua sendo empregado na agricultura para o controle de pragas em diversas culturas, incluindo algodão, milho, soja, citros, pera, nectarina, morango (Solomon *et al.*, 2014), além do café.

A toxicidade do CL levou à sua proibição em países como a Tailândia e nos estados-membros da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2021). A intoxicação por organofosforados é um fator de risco, por aumentar as taxas de mortalidade e comorbidade, principalmente em países subdesenvolvidos (Peter; Cherian, 2000). Para além das preocupações com a saúde humana, valores subletais desse químico ameaçam a sobrevivência das colônias de abelhas ao enfraquecerem sua locomoção e promoverem mortalidade (Christen *et al.*, 2019).

Os efeitos subletais dos agrotóxicos sobre abelhas são amplamente documentados na literatura. A avaliação das alterações morfológicas no intestino, primeiro órgão a ter contato com o agrotóxico em exposições orais, e nos túbulos de Malpighi (figura 4), responsáveis pela excreção e manutenção da homeostase, é importante para estudos de ecotoxicidade.

Figura 4. Morfologia do intestino e túbulos de Malpighi de *S. postica* forrageira.



Legendas: (IN) Intestino; (TM) Túbulos de Malpighi. **Fonte:** Elaborado pela autora, 2024.

Esses tecidos desempenham papéis fundamentais na metabolização e eliminação de substâncias tóxicas, e podem apresentar alterações estruturais que indicam a ação do agrotóxico no organismo (Kakamand *et al.*, 2008; Silva-Zacarin *et al.*, 2011). O sistema digestivo dos insetos é composto por uma camada de células epiteliais sobre uma membrana basal sido dividido em três regiões: o intestino anterior, intestino posterior e o intestino médio (Snodgrass, 1993; Cruz-Landim, 2009).

O intestino médio é responsável pela absorção dos compostos ingeridos pelo inseto, através da digestão enzimática. Estudos indicam que as células epiteliais do intestino médio desempenham funções de desintoxicação contra agentes e moléculas xenobióticas (Terra; Ferreira, 1994; Silva *et al.*, 2012). Este processo transforma compostos tóxicos em substâncias menos prejudiciais, facilitando sua filtração pelos túbulos de Malpighi e eliminação do organismo (Silva *et al.*, 2012).

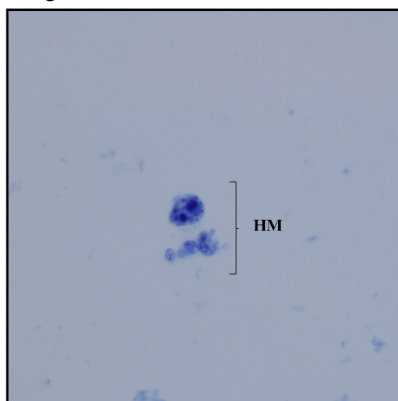
Dessa forma, quando as abelhas são expostas a agrotóxicos, o comprometimento tecidual do intestino permite que uma maior quantidade de compostos químicos atinjam a hemolinfa, chegando às células dos túbulos de Malpighi e provocando lesões e processos de morte celular (Soares-Lima, 2012), além de impactar o órgão alvo. O envolvimento dos túbulos de Malpighi na excreção de substâncias químicas não metabolizadas ou em excesso faz com que desempenhem um papel importante nos processos de desintoxicação (Nocelli *et al.*, 2016).

Os túbulos de Malpighi têm como principal função a filtração da hemolinfa, removendo resíduos metabólicos e toxinas, além de regular o equilíbrio entre solutos e água. Essa filtração gera a urina primária, sendo posteriormente reabsorvida no reto ou íleo, que contribui para a manutenção da pressão osmótica interna (Cruz-Landim, 2009; Nocelli *et al.*,

2016; Klowden, 2022). Todas as substâncias tóxicas filtradas pelos túbulos de Malpighi são eliminadas da hemolinfa ou absorvidas e armazenadas inativamente no interior de células especializadas (Cruz-Landim, 2009). A eficiência do sistema excretor depende da ação e circulação do fluido interno dos insetos.

Nesse contexto, a hemolinfa é responsável pelo transporte de moléculas essenciais para os tecidos. Ela também desempenha funções relacionadas à regulação térmica e defesa imunológica (Cruz-Landim, 2009; Chapman, 2013; Butolo *et al.*, 2021). Essa resposta imunológica é composta por duas vias principais: humoral e celular. A reação humoral é caracterizada pela coagulação da hemolinfa para melanização de agentes externos ao organismo, enquanto a reação celular é baseada na ação dos hemócitos, responsáveis pela fagocitose de corpos estranhos através do englobamento, formação de fagossomos e eliminação por digestão (Medzhitov; Janeway, 2002; Merzendorfer, 2025) (figura 5).

Figura 5. Hemócitos de *S. postica* forrageira corados com azul de metileno a 4%.



Legendas: (HM) Hemócitos. **Fonte:** Elaborado pela autora, 2025.

Os ingredientes ativos dos agrotóxicos podem atingir a hemolinfa devido à ineficiência da ativação dos processos de desintoxicação no intestino e filtragem dos túbulos de Malpighi. A contagem total do número de hemócitos (CTH) é uma ferramenta de valor para mensuração indireta da imunocompetência celular basal dos insetos (Tanada; Kaya, 1993). Segundo Brandt e colaboradores (2016), a CTH é um dos principais meios de mensurar a imunocompetência das abelhas. Dessa forma, a análise dos efeitos subletais dos agrotóxicos em nível celular é relevante para compreender os impactos desses compostos sobre os polinizadores.

Diversos autores estudam as reações subletais de agrotóxicos em abelhas melíferas (Rossi *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2014; Catae *et al.*, 2014, 2018; Tavares *et al.*, 2015; Inoue

et al., 2022), por serem organismos generalistas, populosos e utilizados como modelos nos testes de toxicidade (Hung *et al.*, 2018). Estudos com abelhas nativas ainda são pouco numerosos em comparação com *A. mellifera*, mas autores estão contribuindo para a diminuição da lacuna de informações no entendimento dos impactos dos agrotóxicos na morfologia e fisiologia desses polinizadores (Dorigo *et al.*, 2018; Guimarães-Cestaro *et al.*, 2020; Miotelo *et al.*, 2021; Dorneles *et al.*, 2021; Farder-Gomes *et al.*, 2021, 2024; Aguiar *et al.*, 2023; Lourencetti *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2024; De Souza *et al.*, 2024).

A abelha *S. postica* é de interesse para estudos ecotoxicológicos por apresentar semelhanças morfológicas e biológicas com *Trigona spinipes* Fabricius (1793), uma espécie nativa com potencial para ser utilizada como organismo modelo em testes de toxicidade (Viana-Silva *et al.*, 2017; Rosa-Fontana *et al.*, 2020). Considerando a vulnerabilidade das abelhas em campo e o seu papel na agricultura e biodiversidade, é de importância avaliar os efeitos dos agrotóxicos sobre a sua saúde. Entretanto, trabalhos que estudem o impacto do MZ e do CL na morfologia do sistema digestório e excretor, bem como a avaliação da CTH para o sistema imunológico de *S. postica*, não são bem explorados até o momento.

Visando auxiliar com a produção de trabalhos relevantes para este entendimento, a presente pesquisa avaliou as alterações morfológicas e imunológicas em forrageiras e recém-emergidas de *S. postica* expostas a valores residuais estimados do fungicida MZ e inseticida CL. Embora a utilização de concentrações residuais seja relevante para organismos forrageiros, que entram em contato direto com os agrotóxicos em campo, esses compostos podem ser transportados para a colônia por meio do néctar, pólen e água coletados, contaminando o alimento, a cera e o interior do ninho. Portanto, abelhas recém-emergidas se tornam expostas a esses resíduos mesmo sem deixar a colônia, estando sujeitas a uma exposição crônica capaz de provocar alterações fisiológicas e comportamentais.

O trabalho foi dividido em dois capítulos para melhor divisão metodológica e dos resultados.

1. **Capítulo I:** manuscrito para avaliar as alterações morfológicas do intestino e dos túbulos de Malpighi de abelhas *S. postica* expostas a valores residuais dos agrotóxicos MZ e CL, por via oral e tópica, em intervalos de 24, 48, 72 e 96 horas. As análises empregaram o escore padronizado por Grella e colaboradores (2019), técnicas de microscopia e análises quantitativas.
2. **Capítulo II:** manuscrito para avaliar a CTH em abelhas *S. postica* expostas aos mesmo valores residuais e intervalos do Capítulo I, por via oral. Para

avaliar a concentração de hemócitos por mL de hemolinfa, foi utilizado o protocolo adaptado de Butolo e colaboradores (2020), a fórmula adaptada de Domingues e colaboradores (2017) e análises quantitativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANO, K. Attempt to introduce stingless bees for the pollination of crops under greenhouse conditions in Japan. *Food & Fertilizer Technology Center Technical Bulletin*, n. 167, p. 1-9, 2004.

ABDELKADER, S. M. *et al.* Some toxicological health hazards of mancozeb. *Zagazig Journal of Forensic Medicine*, v. 21, n. 2, p. 148-160, 2023.

A.B.E.L.H.A. *Scaptotrigona postica*. Fichas catalográficas das espécies relevantes para a meliponicultura: Série 2. A.B.E.L.H.A. & ICMBio, 2022. Disponível em: <https://abelha.org.br/fichas-catalogograficas-das-especies-relevantes-para-a-meliponicultura-2/>. Acesso em: novembro de 2024.

GOV (AGÊNCIA GOV). *Pesquisa da Embrapa insere abelhas em cafezais e produtividade sobe 16,5%*, 2024. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202410/pesquisa-da-embrapa-insere-abelhas-em-cafezais-e-produtividade-sobe-16-5>. Acesso em: novembro de 2024.

AGROBEE. *Polinização de café: quais as vantagens?*, 2021. Disponível em: <https://www.agrobee.net/polinizacao/polinizacao-de-cafe-quais-as-vantagens/>. Acesso em: outubro de 2024.

AGUIAR, J. M. R. B. V. *et al.* Neonicotinoid effects on tropical bees: Imidacloprid impairs innate appetitive responsiveness, learning and memory in the stingless bee *Melipona quadrifasciata*. *Science of The Total Environment*, v. 877, p. 162859, 2023.

ALVES, D. A. *et al.* A sustainable and bee-pollinated coffee to start your day. *bioRxiv*, 2024.

BARBIÉRI, C. & FRANCOY, T. M. Theoretical model for interdisciplinary analysis of human activities: Meliponiculture as an activity that promotes sustainability. *Ambiente & Sociedade*, v. 23, p. e00202, 2020.

BLOCH, G. *et al.* Time is honey: circadian clocks of bees and flowers and how their interactions may influence ecological communities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 372, n. 1734, p. 20160256, 2017.

BRITO, P. *et al.* The effects of field-realistic doses of imidacloprid on *Melipona quadrifasciata* (Apidae: Meliponini) workers. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, p. 38654-38661, 2020.

BRASIL AGRO. Canéfora se consolida no segmento dos cafés especiais, 2024. Disponível em: <https://www.brasilagro.com.br/conteudo/canefora-se-consolida-no-segmento-dos-cafes-especiais.html>. Acesso em: novembro de 2024.

BRANDT, A. *et al.* The neonicotinoids thiacloprid, imidacloprid, and clothianidin affect the immunocompetence of honey bees (*Apis mellifera* L.). *Journal of Insect Physiology*, v. 86, p. 40-47, 2016.

BUTOLO, N. P. *et al.* A high quality method for hemolymph collection from honeybee larvae. *PloS one*, v. 15, n. 6, p. e0234637, 2020.

BOMFIM, I. G. C. *et al.* Adaptive and foraging behavior of two stingless bee species in greenhouse mini watermelon pollination. *Sociobiology*, v. 61, n. 4, pp. 502-509, 2014.

CAMUS, A. *Summer*. United Kingdom, Penguin Books, 1995.

CARSON, R. *Silent Spring*. United States, Houghton Mifflin, 1962.

CATAE, A. F. *et al.* Cytotoxic effects of thiamethoxam in the midgut and malpighian tubules of Africanized *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae). *Microscopy Research and Technique*, v. 77, n. 4, p. 274-281, 2014.

CATAE, A. F. *et al.* Exposure to a sublethal concentration of imidacloprid and the side effects on target and nontarget organs of *Apis mellifera* (Hymenoptera, Apidae). *Ecotoxicology*, v. 27, n. 2, p. 109-121, 2018.

CAMPBELL, A. J. *et al.* Temporal variation in homing ability of the neotropical stingless bee *Scaptotrigona aff. postica* (Hymenoptera: Apidae: Meliponini). *Apidologie*, v. 50, pp.720-732, 2019.

CAMPBELL, A. J. *et al.* High bee functional diversity buffers crop pollination services against Amazon deforestation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 326, p. 107777, 2022.

CHAPMAN, A. D. *The insects: structure and function*. England, Cambridge University Press, 2013.

CHRISTEN, V. *et al.* Transcriptional and physiological effects of the pyrethroid deltamethrin and the organophosphate dimethoate in the brain of honey bees (*Apis mellifera*). *Environmental Pollution*, v. 244, p. 247-256, 2019.

CONCEIÇÃO, C. H. C. *et al.* Flutuação populacional do bicho-mineiro em cultivares de café arábica resistentes à ferrugem. *Bragantia*, v. 64, p. 625-631, 2005.

COSTA, C. *et al.* Assessment of mancozeb exposure, absorbed dose, and oxidative damage in greenhouse farmers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 17, 2022, 10486.

CRUZ-LANDIM, C. *Abelhas: morfologia e função de sistemas*. Brasil, Ed. UNESP, 2009.

D'AVILA, M.; MARCHINI, L. C. Polinização realizada por abelhas em culturas de importância econômica no Brasil. *Boletim de Indústria Animal*, v. 62, n. 1, p. 79-90, 2005.

DE MENEZES, P. S. E. The stingless bee fauna in Brazil (Hymenoptera: apidae). *Sociobiology*, v. 61, n. 4, pp. 348-354, 2014.

DHANESHWAR, A.; HARDEJ, D. Disruption of mitochondrial complexes, cytotoxicity, and apoptosis results from Mancozeb exposure in transformed human colon cells. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, v. 84, 2021, 103614.

DOS SANTOS, C. F. *et al.* Diversidade de abelhas sem ferrão e seu uso como recurso natural no Brasil: permissões e restrições legais consorciadas a políticas públicas. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 9, n. 2, 2021.

DORNELES, A. L. *et al.* Toxicity of organophosphorus pesticides to the stingless bees *Scaptotrigona bipunctata* and *Tetragonisca fiebrigi*. *Apidologie*, v. 48, n. 5, p. 612–620, 2017.

DORNELES, A. L. *et al.* Larvae of stingless bee *Scaptotrigona bipunctata* exposed to organophosphorus pesticide develop into lighter, smaller and deformed adult workers. *Environmental Pollution*, v. 272, p. 116414, 2021.

DOMINGUES, C. E. C. *et al.* Thiamethoxam and picoxystrobin reduce the survival and overload the hepato-nephrotoxic system of the Africanized honeybee. *Chemosphere*, v. 186, p. 994-1005, 2017.

DORIGO, A. *et al.* Biological data of stingless bees with potential application in pesticide risk assessments. *Sociobiology*, v. 65, n. 4, p. 777-779, 2018.

DÖTTERL, S.; VEREECKEN, N. J. The chemical ecology and evolution of bee–flower interactions: a review and perspectives. *Canadian Journal of Zoology*, v. 88, n. 7, p. 668–697, 2010.

ENGEL, M. S. *et al.* Stingless bee classification and biology (Hymenoptera, Apidae): a review, with an updated key to genera and subgenera. *ZooKeys*, v. 1172, n. 239, 2023.

ESCOBAR-GONZÁLEZ, D. *et al.* Fruit production in coffee (*Coffea arabica* L.) crops is enhanced by the behaviour of wild bees (Hymenoptera: Apidae). *Austral Entomology*, v. 63, n. 1, p. 82-94, 2024.

EUROPEAN COMMISSION. *Commission Implementing Regulation (EU) 2020/2087 of 14 December 2020 concerning the non-renewal of the approval of the active substance mancozeb*, 2020. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R2087&from=EN>. Acesso em: março de 2023.

FAITA, M. R. *et al.* A expansão do agronegócio: impactos nefastos do desmatamento, agrotóxicos e transgênicos nas abelhas. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 57, 2021.

FARDER-GOMES, C. F. *et al.* Harmful effects of fipronil exposure on the behavior and brain of the stingless bee *Partamona helleri* Friese (Hymenoptera: Meliponini). *Science of the Total Environment*, v. 794, p. 148678, 2021.

FARDER-GOMES, C. F. *et al.* Exposure to sublethal concentrations of imidacloprid, pyraclostrobin, and glyphosate harm the behavior and fat body cells of the stingless bee *Scaptotrigona postica*. *Science of The Total Environment*, v. 907, p. 168072, 2024.

GARIBALDI, L. A. *et al.* Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science*, v. 339, n. 6127, p. 1608-1611, 2013.

GEORGE, N. *et al.* Biodegradation and analytical methods for detection of organophosphorous pesticide: chlorpyrifos. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, v. 20, n. 2, p. 79, 2014.

GIOVANNETTI, M. *et al.* Mycorrhizal fungi in ecotoxicological studies: Soil impact of fungicides, insecticides and herbicides. *Prevention Today*, v. 2, n. 1-2, p. 47-62, 2006.

GIANNINI, T. C. *et al.* The dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil. *Journal of Economic Entomology*, p. 1-9, 2015.

GISI, U.; SIEROTZKI, H. Fungicide modes of action and resistance in downy mildews. *The Downy Mildews-Genetics, Molecular Biology and Control*, p. 157-167, 2008.

GRELLA, T. C. *et al.* Semi-quantitative analysis of morphological changes in bee tissues: A toxicological approach. *Chemosphere*, v. 236, p. 124255, 2019.

GOMES, I. N. *et al.* The survival and flight capacity of commercial honeybees and endangered stingless bees are impaired by common agrochemicals. *Ecotoxicology*, v. 32, n. 7, p. 937-947, 2023.

GOVERNO FEDERAL (GOV). *O Brasil é o maior produtor mundial e o segundo maior consumidor de café*, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-e-o-maior-produtor-mundial-e-o-segundo-maior-consumidor-de-cafe>. Acesso em: novembro de 2024.

GUIMARÃES-CESTARO, L. *et al.* Occurrence of virus, microsporidia, and pesticide residues in three species of stingless bees (Apidae: Meliponini) in the field. *The Science of Nature*, v. 107, p. 1-14, 2020.

GULLINO, M. L. *et al.* Mancozeb: past, present, and future. *Plant Disease*, v. 94, n. 9, p. 1076-1087, 2010.

HESS, S. C. *et al.* Agrotóxicos: críticas à regulação que permite o envenenamento do país. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 2021.

HIPÓLITO, J. *et al.* A. The value of pollinator-friendly practices: synergies between natural and anthropogenic assets. *Basic and Applied Ecology*, v. 17, n. 8, p. 659-667, 2016.

HIPÓLITO, J. *et al.* Landscape and crop management strategies to conserve pollination services and increase yields in tropical coffee farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 256, p. 218-225, 2018.

HUNG, K. L. J. *et al.* The worldwide importance of honey bees as pollinators in natural habitats. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 285, n. 1870, p. 1-8, 2018.

IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; NUNES-SILVA, P. As abelhas, os serviços ecossistêmicos e o Código Florestal Brasileiro. *Biota Neotropica*, v. 10, n. 4, p. 59-62, 2010.

IPBES (INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES). *The assessment report of the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services on pollinators, pollination and food production*, 2016. Germany, Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). *Boletins anuais de produção, importação, exportação e vendas de agrotóxicos no Brasil*, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>>. Acesso em: abril de 2023.

INOUE, L. V. B. *et al.* Harmful effects of pyraclostrobin on the fat body and pericardial cells of foragers of africanized honey bee. *Toxics*, v. 10, n. 9, p. 530, 2022.

JOHNSON, R. M. Honey bee toxicology. *Annual Review of Entomology*, v. 60, n. 1, p. 415-434, 2015.

JOHNSON, S. D. & ANDERSON, B. Coevolution between food-rewarding flowers and their pollinators. *Evolution: Education and Outreach*, v. 3, pp. 32-39, 2010.

KAKAMAND, F. A. K. *et al.* The role of three insecticides in disturbance the midgut tissue in honey bee *Apis mellifera* L. workers. *Journal of Dohuk University*, v. 11, n. 1, p. 144-151, 2008.

KERR, W. E. *et al.* *Abelha Uruçu - Biologia, Manejo e Conservação*. Brasil, Fundação Acangaú, 1996.

KERR, W. E. *et al.* Aspectos pouco mencionados da biodiversidade amazônica. *Parcerias Estratégicas*, v. 12, n. 2, p. 20-41, 2001.

KLEIN, A. M. *et al.* Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of The Royal Society B: Biological Sciences*, v. 274, n. 1608, p. 303-313, 2007.

KLEIN, A. M. *et al.* *A polinização agrícola por insetos no brasil: um guia para fazendeiros, agricultores, extensionistas, políticos e conservacionistas*. Alemanha, Nature Conservation and Landscape Ecology, 2020.

KLOWDEN, M. J. *Physiological Systems in Insects*. Academic Press, 2022.

KUMAR, P. *et al.* Insight into the environmental fate, hazard, detection, and sustainable degradation technologies of chlorpyrifos—an organophosphorus pesticide. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 50, p. 108347-108369, 2023.

LEE, W. J. *et al.* Cancer incidence among pesticide applicators exposed to chlorpyrifos in the Agricultural Health Study. *Journal of the National Cancer Institute*, v. 96, n. 23, p. 1781-1789, 2004.

LOPES, M. *et al.* Abelhas sem-ferrão: a biodiversidade invisível. *Agriculturas*, v. 2, n. 4, p. 1-3, 2005.

LOURENCETTI, A. P. S. *et al.* Surrogate species in pesticide risk assessments: Toxicological data of three stingless bees species. *Environmental Pollution*, v. 318, p. 120842, 2023.

MATSUMURA, F. *Toxicology of insecticides*. USA, Springer Science & Business Media, 2012.

MEDCHEMEXPRESS. *Chlorpyrifos*. Disponível online em: <https://www.medchemexpress.com>. Acesso em: novembro de 2024.

MEDCHEMEXPRESS. *Mancozeb*. Disponível online em: <https://www.medchemexpress.com>. Acesso em: novembro de 2024.

MEDZHITOV, R.; JANEWAY, C. A. Innate immunity: the virtues of a nonclonal system of recognition. *Cell*, v. 91, n. 3, p. 295-298, 1997.

MELÉNDEZ, R. V. *et al.* Crop pollination by stingless bees. In: VIT, P. *et al.* Pot-pollen in stingless bee melittology. Springer Cham, pp. 139-153, 2018.

MELO, G. A. R. *et al.* *Catálogo de abelhas Moure*. Universidade Federal do Paraná, 2011.

MERZENDORFER, H. *Hemolymph: a fluid tissue with versatile functions*. Insect Anatomy: Structure and Function. Academic Press, 2025.

MIOTELO, L. *et al.* Apis mellifera and Melipona scutellaris exhibit differential sensitivity to thiamethoxam. *Environmental Pollution*, v. 268, p. 115770, 2021.

MUTO, N. A. *et al.* Impact of the introduction of stingless bee colonies (*Scaptotrigona aff. postica*) on the productivity of acai (*Euterpe oleracea*). *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 15, n. 3, 2020.

NOCELLI, R. C. F. *et al.* Comparative physiology of Malpighian tubules: form and function. *Open Access Insect Physiology*, p. 13-23, 2016.

OLIVEIRA, R. A. *et al.* Side-effects of thiamethoxam on the brain and midgut of the africanized honeybee *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae). *Environmental Toxicology*, v. 29, n. 10, p. 1122-1133, 2014.

OLIVEIRA, W. *et al.* Food plants in Brazil: origin, economic value of pollination and pollinator shortage risk. *Science of The Total Environment*, v. 912, p. 169147, 2024.

OLLERTON, J. *et al.* How many flowering plants are pollinated by animals?. *Oikos*, v. 120, n. 3, pp. 321-326, 2011.

PAPA, G. *et al.* The honey bee *Apis mellifera*: An insect at the interface between human and ecosystem health. *Biology*, v. 11, n. 2, p. 233, 2022.

PARDO, A.; BORGES, P. A. V. Worldwide importance of insect pollination in apple orchards: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 293, p. 106839, 2020.

PATEL, V. *et al.* Why bees are critical for achieving sustainable development. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, v. 50, n. 1, p. 49–59, 2021.

PAZ, J. V. *et al.* *Agrotóxicos no Brasil: entre a produção e a segurança alimentar*, 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/artigos/agrotoxicos-no-brasil-entre-a-producao-e-a-seguranca-alimentar/>. Acesso em: novembro de 2024.

PERRY, J. *et al.* Organophosphate exposure and the chronic effects on farmers: a narrative review. *Rural and Remote Health*, v. 20, n. 1, 2020.

PETER, J. V.; CHERIAN, A. M. Organic insecticides. *Anaesthesia and Intensive Care*, v. 28, n. 1, p. 11-21, 2000.

PONTIN, J. C. *et al.* Panorama sobre o uso de agrotóxicos para café e citros: análise nas agências regulatórias nacionais e internacionais. *Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável*, v. 1, n. 2, 2022.

PORRAS, M. F. *et al.* Fungicide ingestion reduces net energy gain and microbiome diversity of the solitary mason bee. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 3229, 2024.

RAMOS, J. F. *Potenciais efeitos da exposição a fungicidas agrícolas para abelhas-sem-ferrão imaturas: conservação de polinizadores e políticas públicas*. Tese (doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2021.

REAL-LUNA, N. *et al.* Las abejas sin aguijón (Tribu Meliponini) en los agroecosistemas de América Latina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, v. 13, n. 2, p. 331-344, 2022.

ROSA-FONTANA *et al.* What is the most suitable native bee species from the Neotropical region to be proposed as model-organism for toxicity tests during the larval phase?. *Environmental Pollution* v. 265 p. 114849, 2020.

ROSELINO, A. C., S. B. *et al.* Differences between the quality of strawberries (*Fragaria x ananassa*) pollinated by the stingless bees *Scaptotrigona aff. depilis* and *Nannotrigona testaceicornis*. *Genetics and Molecular Research*, v. 8, n. 2, pp. 539-545, 2009.

ROSSI, C. *et al.* Effects of sublethal doses of imidacloprid in malpighian tubules of africanized *Apis mellifera* (Hymenoptera, Apidae). *Microscopy Research and Technique*, v. 76, n. 5, p. 552-558, 2013.

ROUBIK, D. W. Bees: ecological roles. In: STARR, C. (ed.). *Encyclopedia of social insects*. Cham, Suíça: Springer. p. 1-6, 2020.

SANTOS, S. A. B. *et al.* Pollination of cucumber, *Cucumis sativus* L.(Cucurbitales: Cucurbitaceae), by the stingless bees *Scaptotrigona* aff. *depilis* Moure and *Nannotrigona testaceicornis* Lepeletier (Hymenoptera: Meliponini) in greenhouses. *Neotropical Entomology*, v. 37, p. 506-512, 2008.

SANTOS, I. N. *et al.* Implicações das intoxicações exógenas por agrotóxicos à saúde do trabalhador: uma revisão integrativa. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 7, n. 2, p. 16-16, 2021.

SATURNI, F. T. *et al.* Landscape structure influences bee community and coffee pollination at different spatial scales. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 235, p. 1-16, 2016.

SHEFFIELD, P. E. *et al.* Pollinator deficits, food consumption, and consequences for human health in the United States. *Environmental Health Perspectives*, v. 130, n. 12, p. 127003, 2022.

SILVA, J. A. *et al.* Sublethal exposure to thiamethoxam and pyraclostrobin affects the midgut and Malpighian tubules of the stingless bee *Frieseomelitta varia* (Hymenoptera: Apidae: Meliponini). *Ecotoxicology*, v. 33, n. 8, p. 875-883, 2024.

SILVA-ZACARIN, E. *et al.* Structure and function of the intestine and Malpighian tubules: From bee biology to cell marker development for toxicological analysis. *Social Insects: Structure, Function, and Behavior*, p. 121-142, 2011.

SILVA, C. P. *et al.* Digestão em Insetos. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Entomologia Molecular, 2012. Disponível em: <https://www.inctem.bioqmed.ufrj.br/images/documentos/biblioteca/Capitulo_5_Digestao_e_m_Insetos.pdf>. Acesso em: novembro de 2024.

SILVEIRA, F. A. *et al.* Taxonomic constraints for the conservation and sustainable use of wild pollinators: the Brazilian wild bees. *Pollinating bees: the conservation link between agriculture and nature*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 47-56, 2006.

SNODGRASS, R. E. *Principles of insect morphology*. United States, Cornell University Press, 2018.

SOARES-LIMA, H. M. *Avaliação dos efeitos do inseticida imidacloprido para abelhas sem ferrão Scaptotrigona postica Latreille, 1807 (Hymenoptera, Apidae, Meliponini)*. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Rio Claro, 2012.

SOLOMON, R. K. *et al.* Properties and uses of chlorpyrifos in the United States. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 231, p. 13-34, 2014.

SOUZA, E. C. A. *et al.* Stingless bee honey (Hymenoptera, Apidae, Meliponini): A review of quality control, chemical profile, and biological potential. *Apidologie*, v. 52, p. 113-132, 2021.

SOUZA, F. C. *et al.* Thiamethoxam toxicity on the stingless bee *Friesiomelitta varia*: LC50, survival time, and enzymatic biomarkers assessment. *Chemosphere*, v. 363, p. 142853, 2024.

TANADA, Y.; KAYA, H. K. Associations between insects and nonpathogenic microorganisms. *Insect Pathology*, p.12-51, 1993.

TERRA, W. R.; FERREIRA, C. Insect digestive enzymes: Properties, compartmentalization and function. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, v. 109, n. 1, p. 62, 1994.

THOMAS, V. G.; KEVAN, P. G. Insect pollination: commodity values, trade and policy considerations. *Journal Pollination Ecology*, v. 7, n. 2, p. 5-15, 2012.

TAVARES, D. A. *et al.* In vitro effects of thiamethoxam on larvae of Africanized honey bee *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae). *Chemosphere*, v. 135, p. 370-378, 2015.

VENTURA, C. *et al.* Effects of the pesticide chlorpyrifos on breast cancer disease. Implication of epigenetic mechanisms. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, v. 186, p. 96-104, 2019.

VIANA-SILVA, F. *et al.* Selection matrix for Brazilian bee species to risk assessment of pesticides. Hazards of Pesticides to Bees. In: 13th International Symposium of the ICP-PR Bee Protection Group, Valencia, Spain, 2017.

WITTER, S. *et al.* *As abelhas e a agricultura*. Brasil, EDIPUCRS, 2014.