

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE INSETICIDA DE
COMPOSTOS ATIVOS DE ORIGEM VEGETAL NA
BROCA-DA-CANA, *Diatraea saccharalis* (Fabricius)
(LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE), E NO PREDADOR DE
OVOS *Xylocoris sordidus* (Reuter) (HEMIPTERA:
ANTHOCORIDAE)**

Vinícius Ferraz Nascimento

Mestre em Biodiversidade e Conservação da Natureza

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE INSETICIDA DE
COMPOSTOS ATIVOS DE ORIGEM VEGETAL NA
BROCA-DA-CANA, *Diatraea saccharalis* (Fabricius)
(LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE), E NO PREDADOR DE
OVOS *Xylocoris sordidus* (Reuter) (HEMIPTERA:
ANTHOCORIDAE)**

Vinícius Ferraz Nascimento

Orientador: Prof. Dr. Sergio Antonio De Bortoli

Coorientador: Dr. Walter Maccheroni Júnior

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Entomologia Agrícola).

2025

N244a

Nascimento, Vinicius Ferraz

Avaliação da atividade inseticida de compostos ativos de origem vegetal na broca-da-cana, *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae), e no predador de ovos *Xylocoris sordidus* (Reuter) (Hemiptera: Anthocoridae) / Vinicius Ferraz Nascimento. -- Jaboticabal, 2025
102 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Sergio Antonio de Bortoli

1. Entomologia. 2. Agroecologia. 3. Inseticidas Botânicos. 4. Cana-de-açúcar. 5. Controle Biológico. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE INSETICIDA DE COMPOSTOS ATIVOS DE ORIGEM VEGETAL NA BROCA-DA-CANA, *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE), E NO PREDADOR DE OVOS *Xylocoris sordidus* (Reuter) (HEMIPTERA: ANTHOCORIDAE)

AUTOR: VINÍCIUS FERRAZ NASCIMENTO

ORIENTADOR: SERGIO ANTONIO DE BORTOLI

COORIENTADOR: WALTER MACCHERONI JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Entomologia Agrícola), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. SERGIO ANTONIO DE BORTOLI (Participação Presencial)
Departamento de Fitossanidade / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

SERGIO ANTONIO DE BORTOLI
Data: 02/10/2025 10:10:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. LEDA GONÇALVES FERNANDES (Participação Virtual)
Departamento de Agronomia / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINA) - Machado/MG



Documento assinado digitalmente

LEDA GONCALVES
Data: 05/10/2025 18:52:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RICARDO ANTONIO POLANCZYK (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

RICARDO ANTONIO POLANCZYK
Data: 02/10/2025 14:04:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisadora Dra. FLÁVIA FAGUNDES DE PAULA (Participação Virtual)
Cargill Agrícola S/A / Rio Verde/GO



Documento assinado digitalmente

FLAVIA FAGUNDES DE PAULA
Data: 03/10/2025 11:07:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
NILZA MARIA MARTINELLI
Data: 02/10/2025 15:00:11-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. NILZA MARIA MARTINELLI (Participação Presencial)
Departamento de Fitossanidade / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 01 de outubro de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

VINÍCIUS FERRAZ NASCIMENTO – nasceu em Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, em 27 de março de 1997. Filho de Welinton Moreira Nascimento e Eliana Ferraz Nascimento. Em fevereiro de 2014, iniciou seus estudos de graduação em Agronomia na Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Campus Machado (IFSULDEMINAS), Machado, Minas Gerais, onde obteve seu diploma de Bacharel em Agronomia em março de 2019. Durante a graduação, desenvolveu atividades de pesquisa na área de Agroecologia, Extensão, Cafeicultura e Entomologia. Foi bolsista FAPEMIG de Iniciação Científica, durante 1 ano, no projeto “Levantamento da Entomofauna Associada ao Cultivo de Marolo (*Annona crassiflora* Mart.) no Sul de Minas Gerais”, sob orientação da Profa. Dra. Leda Gonçalves. O trabalho de conclusão de curso da graduação teve como título “A Extensão Universitária no Contexto do Programa Expedição IFSULDEMINAS: Um Relato de Experiência.”, com orientação da mesma professora. Iniciou, em março de 2019, o Mestrado em Biodiversidade e Conservação da Natureza, na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, sendo bolsista Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Durante o mestrado desenvolveu o projeto “Avaliação da atividade repelente e inseticida de extratos aquosos vegetais para o controle de cigarrinhas-das-pastagens (Hemiptera: Cercopidae)”, sob orientação da Dr. Alexander Machado Auad, na Embrapa Gado de Leite. Em abril de 2021, recebeu seu título de Mestre em Biodiversidade e Conservação da Natureza. Em agosto de 2021, ingressou no Doutorado em Agronomia (Entomologia Agrícola) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, Brasil, sob a orientação do Prof. Dr. Sergio Antonio De Bortoli e coorientação do Dr. Walter Maccheroni Júnior. Desde 2023 faz parte da Sociedade Entomológica do Brasil – Jovem (SEB Jovem), como representante da região Sudeste.

“Soy,
Soy lo que dejaron,
soy toda la sobra de lo que se robaron.

Un pueblo escondido en la cima,
mi piel es de cuero por eso aguanta cualquier clima.

Soy una fábrica de humo,
mano de obra campesina para tu consumo
Frente de frío en el medio del verano,
el amor en los tiempos del cólera, mi hermano.

El sol que nace y el día que muere,
con los mejores atardeceres.
Soy el desarrollo en carne viva,
un discurso político sin saliva.
Las caras más bonitas que he conocido,
soy la fotografía de un desaparecido.

Soy la sangre dentro de tus venas,
soy un pedazo de tierra que vale la pena.
soy una canasta con frijoles ,
soy Maradona contra Inglaterra anotándote dos goles.

Soy lo que sostiene mi bandera,
la espina dorsal del planeta es mi cordillera.

Soy lo que me enseñó mi padre,
el que no quiere a su patria no quiere a su madre.

Soy América latina,
un pueblo sin piernas pero que camina. ¡oye!”

Latinoamerica - Calle 13

Ofereço

Aos meus pais, Eliana e Welinton, ao meu irmão, Levy, e aos meus tios, tias, avós e avôs, e primos, pelo amor, apoio, palavras de incentivo e compreensão durante toda a minha caminhada.

Dedico

Ao meus pais, que me permitiram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que iluminou meu caminho e fortaleceu minha fé ao longo desta jornada.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV/UNESP, ao Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Fitossanidade) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Entomologia Agrícola), pela oportunidade da realização do curso de doutorado.

Ao meu orientador, Dr. Sergio Antonio de Bortoli, pela paciência na orientação, pelos ensinamentos, pela confiança no meu potencial e pelo constante incentivo, fundamentais para a conclusão deste trabalho de doutorado.

Ao meu coorientador, Dr. Walter Macheroni Junior, pelo apoio, disponibilidade e contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como à Usina São Martinho, pela parceria, fornecimento de recursos e suporte indispensável à execução das pesquisas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Entomologia Agrícola), pelas aulas, ensinamentos, conselhos e suporte durante minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais, Eliana e Welinton, ao meu irmão, Levy, e a toda minha família, pelo imenso esforço, apoio, amor e compreensão em todos os momentos. Dedico a eles esta conquista.

À Letícia Barbosa de Lacerda e ao Pedro Gomes Peixoto, amigos que se tornaram parte essencial desta trajetória. Se não fosse pelo apoio incondicional, pelas conversas sinceras, pelas lágrimas divididas e pelas alegrias celebradas juntos, esta conquista não teria o mesmo significado — talvez nem mesmo tivesse sido possível. Levarei para sempre no coração a força, o carinho e a amizade de vocês.

Aos amigos e companheiros de caminhada em Jaboticabal — Sabrina Oliveira, Joice Mendonça, Juliana Vieira, Lana Carvalho, Vinícius Cesarin, Sarah Caroline, Betina Athaide, Francine Silvério, Jeane Leite, Gustavo Gomes, Lara Fernandes, Beatriz Souza, Fabricio Vasconcelos — expresso minha mais

profunda gratidão. A amizade, o apoio e os momentos compartilhados com vocês foram fundamentais para tornar esta jornada mais leve e significativa.

À minha companheira, Bianca Costa Nascimento, que chegou recentemente à minha vida, mas já ocupa um lugar imenso no meu coração. Sua presença trouxe novos sonhos, leveza e esperança para o futuro. Quero que esta seja apenas a primeira de muitas conquistas que vamos compartilhar e construir juntos ao longo de nossa vida.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Biologia e Criação de Insetos — José Roberto, Ariane Assine, Noemi Liquita, Dagmara Gomes, Vinícius Dorigan, Lucas, Márcio Aparecido, Tainá Alves, Eduardo Bordignon e Gabriela Carvalho — pela colaboração nas atividades, apoio técnico e amizade.

Aos amigos de graduação e para a vida — Breno Alexandre, Kayro Barra Mansa, João Pedro Gama, Thiago Santos, Ricardo Alves e Dalila Pereira — que, mesmo à distância, estiveram presentes com apoio e amizade.

À CNPq e a Usina São Martinho S/A, pelo suporte financeiro a este projeto.

Ao IFSULDEMINAS – Campus Machado e a seus funcionários e professores, pelo apoio e pela contribuição para minha formação profissional.

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais	1
1. Introdução	1
2. Revisão de Literatura	3
3. Referências	11
CAPÍTULO 2 - Insecticidal activity of plant-derived compounds against <i>Diatraea saccharalis</i> Fabr. (Lepidoptera: Crambidae)	19
1. Introduction	1
2. Methods	22
3. Results	26
4. Discussion	28
5. Conclusion	31
6. References	31
CAPÍTULO 3 - Efeitos subletais de três inseticidas de origem botânica no desenvolvimento e reprodução de <i>Diatraea saccharalis</i> (Lepidoptera: Crambidae)	43
1. Introdução	44
2. Material e Métodos	46
3. Resultados	48
4. Discussão	50
5. Conclusão	54
6. Referências	54
CAPÍTULO 4 - Efeitos de inseticidas botânicos sobre o consumo e sobrevivência de <i>Xylocoris sordidus</i> (Hemiptera: Anthocoridae) alimentado com ovos tratados de <i>Diatraea saccharalis</i> (Lepidoptera: Crambidae)	62
1. Introdução	62
2. Material e Métodos	65
3. Resultados e Discussão	70
4. Conclusão	74
5. Referências	75

CAPÍTULO 5 – Considerações finais	86
--	-----------

**AValiação DA ATIVIDADE INSETICIDA DE COMPOSTOS ATIVOS DE
ORIGEM VEGETAL NA BROCA-DA-CANA, *Diatraea saccharalis* (Fabricius)
(LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE), E NO PREDADOR DE OVOS *Xylocoris
sordidus* (Reuter) (HEMIPTERA: ANTHOCORIDAE)**

RESUMO - A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das principais culturas agroindustriais do Brasil, e tem na broca-da-cana, *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae), sua principal praga. O Manejo Integrado da broca é baseado no controle biológico e em aplicações de inseticidas sintéticos. Entretanto, a preocupação crescente com impactos ambientais e riscos a organismos não alvo reforça a necessidade de alternativas mais sustentáveis, como compostos botânicos com atividade inseticida e maior seletividade. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a atividade inseticida de compostos ativos de origem vegetal sobre *D. saccharalis* e sua seletividade ao predador de ovos *Xylocoris sordidus* (Hemiptera: Anthocoridae), visando gerar subsídios para sua inserção em programas de MIP na cultura da cana-de-açúcar. Foram conduzidos bioensaios em condições de laboratório e de casa de vegetação com três monoterpenos (timol, carvacrol e 1,8-cineol), aplicados em diferentes concentrações e vias de exposição. Em laboratório, o carvacrol apresentou a maior toxicidade larval ($CL_{50} = 2,20$ mg/L), seguido de 1,8-cineol ($CL_{50} = 4,43$ mg/L) e timol ($CL_{50} = 9,60$ mg/L). Para ovos, timol e carvacrol promoveram 100% de inviabilidade embrionária a 5,0 mg/L, enquanto 1,8-cineol alcançou 47,6% de efeito ovicida a 8,0 mg/L. Em casa de vegetação, os três compostos mantiveram efeito ovicida relevante, embora com redução de eficácia em relação ao laboratório, com timol e carvacrol atingindo 98,43% e 89,25% de inviabilidade, respectivamente, e 1,8-cineol 60,76%. Esses resultados demonstram que timol e carvacrol são particularmente promissores para o controle de ovos e larvas de *D. saccharalis*, mas evidenciam também a influência de fatores ambientais sobre a estabilidade e o desempenho dos monoterpenos. Doses subletais dos compostos afetaram componentes de aptidão da praga. A pupação foi reduzida por carvacrol e 1,8-cineol, a eclosão de ovos decaiu em todos os tratamentos, e a fecundidade foi reduzida apenas pelo carvacrol. As tabelas de vida indicaram que o carvacrol promoveu a maior supressão populacional, reduzindo a taxa líquida de reprodução (R_0) e a taxa intrínseca de crescimento (r_m) e aumentando o tempo de duplicação (D_t); o 1,8-cineol apresentou efeito intermediário, centrado na viabilidade dos ovos, enquanto o timol manteve um perfil demográfico próximo ao controle. Esses resultados mostram que, mesmo sem alterar a cronologia do ciclo, monoterpenos podem desacelerar o crescimento populacional de *D. saccharalis* por meio de efeitos subletais cumulativos sobre pupação, eclosão e fecundidade. No quarto capítulo, foi investigada a seletividade desses compostos ao predador *X. sordidus*, utilizando ovos de *D. saccharalis* tratados com timol, carvacrol ou 1,8-cineol. Bioensaios de toxicidade por contato e ingestão indicaram que a via de contato é mais nociva para ninfas de quarto ínstar e adultos, com timol e carvacrol exibindo maior toxicidade, enquanto 1,8-cineol foi o menos prejudicial. Em testes de consumo, *X. sordidus* manteve maior atividade predatória sobre ovos tratados com 1,8-cineol, ao passo que timol e carvacrol reduziram significativamente o consumo,

evidenciando efeitos negativos sobre o desempenho alimentar do predador. Em conjunto, os resultados indicam que timol e carvacrol possuem elevado potencial para o controle de *D. saccharalis*, combinando efeitos letais e subletais sobre ovos e larvas, enquanto o 1,8-cineol se destaca como o composto mais compatível com *X. sordidus*. Do ponto de vista aplicado, essas informações reforçam que compostos botânicos podem integrar o manejo de *D. saccharalis*, desde que suas estratégias de uso considerem simultaneamente eficácia sobre a praga e segurança aos inimigos naturais, incluindo a definição de doses, janelas de aplicação e combinações com liberações de parasitoides e predadores.

Palavras-Chave: 1,8-cineol, carvacrol, inseticidas botânicos, manejo integrado de pragas, timol, seletividade.

**EVALUATION OF THE INSECTICIDAL ACTIVITY OF PLANT-DERIVED
ACTIVE COMPOUNDS AGAINST THE SUGARCANE BORER, *Diatraea
saccharalis* (Fabricius) (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE), AND THE EGG
PREDATOR *Xylocoris sordidus* (Reuter) (HEMIPTERA: ANTHOCORIDAE)**

ABSTRACT - *Sugarcane* (*Saccharum* spp.) is one of the main agro-industrial crops in Brazil and has the sugarcane borer, *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae), as its key pest. Integrated management of this borer is based on biological control and applications of synthetic insecticides. However, growing concern about environmental impacts and risks to non-target organisms reinforces the need for more sustainable alternatives, such as botanical compounds with insecticidal activity and greater selectivity. In this context, the aim of this study was to evaluate the insecticidal activity of plant-derived active compounds against *D. saccharalis* and their selectivity to the egg predator *Xylocoris sordidus* (Hemiptera: Anthocoridae), in order to provide support for their integration into IPM programs in sugarcane crops. Laboratory and greenhouse bioassays were conducted with three monoterpenes (thymol, carvacrol, and 1,8-cineole), applied at different concentrations and via different exposure routes. Under laboratory conditions, carvacrol showed the highest larval toxicity ($LC_{50} = 2.20$ mg/L), followed by 1,8-cineole ($LC_{50} = 4.43$ mg/L) and thymol ($LC_{50} = 9.60$ mg/L). For eggs, thymol and carvacrol caused 100% embryonic inviability at 5.0 mg/L, whereas 1,8-cineole achieved 47.6% ovicidal effect at 8.0 mg/L. In the greenhouse, all three compounds maintained relevant ovicidal activity, although with reduced efficacy compared with the laboratory, with thymol and carvacrol reaching 98.43% and 89.25% inviability, respectively, and 1,8-cineole 60.76%. These results show that thymol and carvacrol are particularly promising for the control of *D. saccharalis* eggs and larvae, but also highlight the influence of environmental factors on monoterpene stability and performance. Sublethal doses of the compounds affected pest fitness components. Pupation was reduced by carvacrol and 1,8-cineole, egg hatching declined in all treatments, and fecundity was reduced only by carvacrol. Life-table analyses indicated that carvacrol promoted the greatest population suppression, reducing the net reproductive rate (R_0) and intrinsic rate of increase (r_m) and increasing the doubling time (D_t); 1,8-cineole had an intermediate effect, mainly on egg viability, whereas thymol maintained a demographic profile close to the control. These results show that, even without altering the timing of the life cycle, monoterpenes can slow *D. saccharalis* population growth through cumulative sublethal effects on pupation, hatching, and fecundity. In the fourth chapter, the selectivity of these compounds to the predator *X. sordidus* was investigated using *D. saccharalis* eggs treated with thymol, carvacrol, or 1,8-cineole. Contact and ingestion toxicity bioassays indicated that the contact route is more harmful to fourth-instar nymphs and adults, with thymol and carvacrol exhibiting higher toxicity, whereas 1,8-cineole was the least detrimental. In prey-consumption tests, *X. sordidus* maintained higher predatory activity on eggs treated with 1,8-cineole, whereas thymol and carvacrol significantly reduced consumption, revealing negative effects on the predator's feeding performance. Taken together, the results

indicate that thymol and carvacrol have high potential for the control of *D. saccharalis*, combining lethal and sublethal effects on eggs and larvae, whereas 1,8-cineole stands out as the most compatible compound with *X. sordidus*. From an applied perspective, these findings reinforce that botanical compounds can be integrated into *D. saccharalis* management, provided that their use strategies simultaneously consider efficacy against the pest and safety to natural enemies, including the definition of doses, application windows, and combinations with parasitoid and predator releases.

Key Words: 1,8-cineole, carvacrol, botanical insecticides, integrated pest management, thymol, selectivity.

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1. Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das culturas agrícolas mais importantes para a economia brasileira, destacando-se como matéria-prima para a produção de açúcar, etanol e bioenergia (Rossi et al., 2021; Wiesberg et al., 2021; Liu et al., 2023). Historicamente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. No levantamento mais recente da CONAB (safra 2025/26), estima-se 668,8 milhões de toneladas de cana em 8,85 milhões de hectares a serem colhidos. Os principais estados produtores são São Paulo, seguido de Minas Gerais e de Goiás (CONAB, 2025). Porém, a produção incorre de desafios fitossanitários significativos, como os insetos-praga que incidem sobre os canaviais causam prejuízos anuais da ordem de bilhões de reais (Alves et al., 2024; Mehdi et al., 2024; Xavier et al., 2024). Dentre essas pragas, a broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*) (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae) destaca-se como uma das mais prejudiciais, presente em todas as regiões canavieiras do Brasil (Francischini et al., 2017; Alves et al., 2024)

As larvas da broca-da-cana, ao se alimentarem no interior dos colmos, formam galerias que interrompem o fluxo de seiva, provocando a morte de gemas e perfilhos em plantas jovens, além de reduzir o peso e o teor de sacarose dos colmos infestados (Rossato et al., 2013; Hernández-García et al., 2015; Tomaz et al., 2018; Li et al., 2024). Esses danos também favorecem a entrada de fungos oportunistas, como *Colletotrichum falcatum* (Rossato et al., 2013; Gallan et al., 2023). Sabe-se que infestações não controladas podem reduzir tanto a produtividade agrícola quanto a qualidade industrial da cana. Estima-se que cada 1% de entrenós infestados pela broca acarrete aproximadamente 0,77% de perda em peso de colmos e 0,25% de perda na produção de açúcar. Em termos nacionais, níveis de infestação em torno de 3–4%, implicam em reduções de dezenas de milhões de toneladas na safra e prejuízos superiores a R\$ 4–5 bilhões por ano ao setor sucroenergético (Salvatore et al., 2010; Francischini et al., 2017). Não por acaso, a broca-da-cana é responsável por mais da metade dos prejuízos econômicos atribuídos às pragas da cana-de-açúcar (Alves et al., 2024).

Nesse cenário, o Manejo Integrado de Pragas (MIP) torna-se indispensável na cultura da cana, entre os pilares do MIP, o controle biológico tem papel de destaque e tradição na canavicultura brasileira (Gomes Garcia et al., 2024; Li et al., 2024; Taguti et al., 2024). Programas de controle biológico bem-sucedidos incluem a utilização de parasitoides. A vespa *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891) (Hymenoptera: Braconidae) foi introduzida na década de 1970 e liberada em campo para parasitar as lagartas dentro dos colmos (Laranjeira Rôdas et al., 2019; Alves et al., 2024; Abreu Reis et al., 2025). Além disso, *Trichogramma galloi* Zucchi, 1988 (Hymenoptera: Trichogrammatidae) é empregado para parasitar os ovos de *D. saccharalis*, com ampla utilização em liberações comerciais no Brasil (Gomes Garcia et al., 2024). Esses programas contribuíram significativamente para a redução das infestações da broca-da-cana de forma ambientalmente segura (Wilson et al., 2020; Wilson et al., 2022).

Adicionalmente, estudos recentes têm explorado o uso de predadores generalistas como aliados no controle dessa praga (Souza et al., 2022; Arroyo et al., 2023; Braghini et al., 2024; Li et al., 2024). Um exemplo é *Xylocoris sordidus* (Hemiptera: Anthocoridae), um percevejo predador que testado como agente de biocontrole complementar no ecossistema da cana (Nunes, 2022). Resultados de laboratório indicam que ninfas e adultos de *X. sordidus* apresentam elevada capacidade predatória sobre ovos de lepidópteros-praga (Dos Santos et al., 2020), podendo atuar em sinergia com parasitoides como *T. galloi* no controle da broca-da-cana.

Em paralelo ao controle biológico, práticas químicas continuam sendo amplamente utilizadas contra pragas da cana, baseadas em inseticidas sintéticos (Wilson et al., 2022). No entanto, o uso intensivo e por vezes inadequado desses compostos químicos tem resultado em problemas como resistência de populações de insetos, contaminação ambiental e riscos à saúde humana (Sánchez-Bayo e Tennekes 2020; Acayaba et al., 2021; Bonmatin et al., 2021; Panis et al., 2022). Esse contexto tem motivado a busca por alternativas de controle mais sustentáveis e seletivas. Entre elas, destacam-se os inseticidas botânicos, que são obtidos a partir de substâncias ativas derivadas de plantas com efeito inseticida, repelente ou regulador sobre pragas. Diversas espécies vegetais das famílias Meliaceae, Rutaceae, Asteraceae, entre outras, já foram identificadas como fontes de compostos inseticidas naturais (Souto et al., 2021;

Tlak Gajger e Dar 2021; Ayilara et al., 2023). Tais produtos de origem vegetal tendem a apresentar menor persistência no ambiente e toxicidade reduzida a organismos não-alvo, características desejáveis em programas de MIP (Castilhos et al. 2018; Luna-Cruz et al. 2018; Lima et al. 2020; Ahmed et al. 2022). Não obstante, a eficácia inseticida e a seletividade desses botânicos podem variar amplamente conforme a origem do extrato e a praga-alvo, requerendo pesquisas específicas em cada caso.

Diante da importância da cana-de-açúcar e dos desafios impostos pela broca-da-cana, o objetivo geral do presente trabalho foi avaliar a atividade inseticida de compostos ativos de origem vegetal sobre a broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*) e sobre o predador de ovos *Xylocoris sordidus*, visando desenvolver alternativas de controle que integrem eficácia contra a praga e segurança aos inimigos naturais, contribuindo para um manejo integrado de pragas mais sustentável na cultura da cana-de-açúcar.

2. Revisão de Literatura

2.1. A cultura da cana-de-açúcar: importância e desafios fitossanitários

A cultura da cana-de-açúcar possui grande relevância histórica e socioeconômica no Brasil (Rossi et al., 2021; Wiesberg et al., 2021; Danelon et al., 2023). Além de posicionar o país como líder global em produção de açúcar e etanol de cana, o setor sucroenergético é responsável por uma parcela significativa do PIB agrícola e gera milhões de empregos diretos e indiretos (Sajid et al., 2021; Danelon et al., 2023; Ruths et al., 2023; Saldanha et al., 2024). Nos últimos anos, a área cultivada com cana no Brasil situou-se em torno de 8 a 9 milhões de hectares (CONAB, 2025), concentrando-se nas regiões Sudeste (especialmente São Paulo) e Centro-Oeste, com expansão também em partes do Nordeste (D'alessandro et al., 2025). Essa expansão geográfica da canavicultura, inclusive em novas fronteiras agrícolas, tem contribuído para reduzir barreiras naturais e expor a cultura a diferentes problemas fitossanitários (Francischini et al., 2017). Entre os principais desafios estão os insetos-praga, as doenças causadas por patógenos e plantas daninhas competidoras (CTC,

2018; de Castro et al., 2024; Li et al., 2024, Msomba et al., 2024; Poorniammal et al., 2024).

No Brasil, entre as principais pragas da cana-de-açúcar destacam-se a cigarrinha-das-raízes *Mahanarva fimbriolata* (Stål, 1854) (Hemiptera: Cercopidae), o bicudo-da-cana *Sphenophorus levis* Vaurie, 1978 (Coleoptera: Curculionidae), as formigas-cortadeiras *Atta* spp. Fabricius, 1804 (Hymenoptera: Formicidae) e a broca-da-cana *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) (Bini et al., 2023; Ferreira e Ferreira, 2023; Alves et al., 2024; Zanetti et al., 2024). Esses insetos podem causar perdas expressivas na produtividade: por exemplo, infestações intensas de cigarrinha-das-raízes podem reduzir de 15% até 80% da produção em áreas afetadas, devido ao amarelecimento e secamento das plantas pela sucção de seiva e injeção de toxinas pelos insetos (Rosseto e Santiago, 2018; Bini et al., 2023). Já o bicudo-da-cana, ao se alimentar dos rizomas, pode levar à perda de 20–30 toneladas de colmos por hectare/ano e à redução da longevidade do canavial (Alves, 2017; Xavier et al., 2024). No caso da broca-da-cana, conforme detalhado a seguir, os danos diretos e indiretos comprometem tanto o rendimento agrícola quanto a qualidade tecnológica da matéria-prima, impactando a produção de açúcar e etanol (Rossato et al., 2013; Gallan et al., 2023; Li et al., 2024).

Os desafios fitossanitários da cana-de-açúcar exigem estratégias de manejo integradas. Tradicionalmente, o controle químico com inseticidas foi amplamente utilizado nos canaviais para suprimir pragas (Wilson et al., 2022). Contudo, o MIP vem ganhando espaço, visando combinar diferentes táticas de controle de forma compatível e sustentável (Goebel e Nikpay, 2017; Gomes Garcia et al., 2024). Na cultura da cana, o MIP envolve monitoramento constante das pragas (por exemplo, uso de armadilhas de feromônio para monitorar a broca-da-cana), adoção de medidas culturais (como rotação de culturas ou uso de variedades parcialmente resistentes) e a integração de controle químico seletivo com controle biológico (Santos-Cividanes et al., 2021; Wilson et al., 2021; Dam et al., 2023; Li et al., 2024). Vale ressaltar que a canavicultura brasileira tem sido pioneira na aplicação do controle biológico em larga escala, a exemplo do controle da broca-da-cana com parasitoides e do bicudo-da-cana e da cigarrinha-das-raízes com fungos entomopatogênicos, reduzindo a necessidade de pesticidas químicos em milhões de hectares (Laranjeira Rôdas

et al., 2019; Parra e Coelho Jr., 2022; Gomes Garcia et al., 2024; Peč et al., 2024; Abreu Reis et al., 2025). Ainda assim, os desafios persistem, pois cada sistema de produção apresenta condições climáticas e logísticas distintas, exigindo adaptações locais no manejo. A conscientização dos produtores quanto à importância do monitoramento e da aplicação oportuna das medidas de controle também é crucial para o sucesso do MIP.

2.2. *Diatraea saccharalis*: biologia e impacto econômico

A broca-da-cana, *D. saccharalis*, é um lepidóptero da família Crambidae, originário do hemisfério ocidental e atualmente distribuído em praticamente todas as regiões produtoras de cana-de-açúcar nas Américas (Echeverri-Rubiano et al., 2022; Wilson, 2022). No Brasil, *D. saccharalis* ocorre em todas as localidades canavieiras, do Nordeste ao Sul, sendo considerada a praga-chave da cultura devido à frequência e à severidade das infestações (Alves et al., 2024; Li et al., 2024; de Oliveira Cabral et al., 2025). O inseto apresenta ciclo de vida holometábolo, com ovos elipsoidais, de coloração amarelo palha, depositados em massas sobre as folhas da cana-de-açúcar (Carbognin et al., 2023). As larvas recém eclodidas raspam as folhas e após o segundo ínstar larval, penetram nos colmos, formando extensas galerias para se alimentar dos tecidos internos (Silva et al., 2022; Vacari et al., 2024). Esse hábito endofítico protege as larvas, em partes, contra pulverizações de inseticidas de contato, dificultando o controle (Wilson et al., 2022)

As larvas de *D. saccharalis* apresentam cinco instares. No último instar atingem aproximadamente 20–25 mm, apresentam coloração esbranquiçada, cabeça marrom e, ao final, tecem um casulo sedoso, empupando dentro da própria galeria no colmo (Echeverri-Rubiano et al., 2022; Puentes-Cala et al., 2023; Li et al., 2024; Robles-Pérez et al., 2024). O período pupal de *D. saccharalis* dura cerca de 7–10 dias em condições de temperatura elevada, originando a mariposa adulta (Echeverri-Rubiano et al., 2022; Carbognin et al., 2023). Os adultos são mariposas de pequeno porte ($\approx 2\text{--}3$ cm de envergadura), com asas anteriores de coloração amarelo-palha e asas posteriores esbranquiçadas (Beuzelin et al., 2014; Capinera, 2023). Têm hábito crepuscular/noturno e vivem cerca de 5 dias, dispersando-se pelo canavial para

acasalar e reiniciar o ciclo. Em condições tropicais favoráveis, a broca-da-cana pode ter diversas gerações por ano (até 4–5), o que contribui para a rápida multiplicação populacional se medidas de controle não forem aplicadas (Carbognin et al., 2023; Sandoval-Cáceres et al., 2023; Alves et al., 2024).

Os danos causados por *D. saccharalis* à cana-de-açúcar ocorrem tanto de forma direta quanto indireta. Danos diretos decorrem da abertura de galerias no colmo pelas lagartas, interrompendo o fluxo de seiva e provocando morte de gemas e brotações (Li et al., 2024; Mehdi et al., 2024). Em canaviais jovens, isso resulta em falhas na brotação e perfilhamento irregular; em canaviais em fase de crescimento, observa-se o sintoma de “coração morto” (morte do meristema apical), perda de entrenós e desenvolvimento de colmos menores e mais finos (da Silva et al., 2022; Gallan et al., 2023; Mehdi et al., 2024). Plantas atacadas podem apresentar quebra e tombamento devido ao enfraquecimento do colmo, especialmente em situações de fortes ventos forte (Gallan et al., 2023).

Danos indiretos são, talvez, ainda mais significativos economicamente, decorrem das perfurações feitas pelas larvas que servem de porta de entrada para microorganismos patogênicos, em particular fungos como *C. falcatum* (causador da podridão vermelha) e outras podridões, que deterioram os tecidos internos e consomem açúcares (Marins et al., 2022; Silva et al., 2024). Assim, além da perda de peso da cana, ocorre diminuição do teor de sacarose do caldo e aumento de impurezas, prejudicando o rendimento industrial na fabricação de açúcar e etanol (Silva et al., 2021; Silva et al., 2024). Pesquisas indicam que infestações de broca podem reduzir de 10% a 20% a quantidade de açúcar recuperável por tonelada de cana moída, dependendo do nível de ataque (Mehdi et al., 2021). Um reflexo disso é a necessidade de se moer maior quantidade de cana para obter a mesma produção de açúcar/etanol, elevando custos industriais.

Do ponto de vista quantitativo, estudos recentes no Brasil estimam uma relação direta entre o percentual de entrenós brocados por *D. saccharalis* e as perdas de produtividade e de açúcar. Em ensaios de campo, Assis et al. (2022) estimaram aproximadamente 2,9% de queda em TCH e $\approx$ 3,3% em POL por hectare a cada 1% de dano por broca. Revisões contemporâneas também consolidam que o aumento de entrenós brocados reduz peso de colmos, qualidade do caldo e recuperação de açúcar, enquadrando *D. saccharalis* como

praga-chave justamente por seus impactos industriais (Li et al., 2024; Mehdi et al., 2024). Esses coeficientes vêm sendo utilizados em análises econômicas e de manejo, nas quais maiores níveis de infestação implicam perdas proporcionais de rendimento (Wilson et al., 2021; Alves et al., 2024). Para ilustrar a ordem de grandeza, aplicando o coeficiente de Assis et al. (2022) a uma safra brasileira de 677 milhões toneladas de cana (CONAB, 2025), uma infestação média de 3% em entrenós poderia se traduzir em 8,7% de queda de TCH, ou 59 milhões de toneladas de cana não colhida, ou seja, prejuízos anuais bilionários em cenários de controle ineficiente.

O manejo de *D. saccharalis*, historicamente, envolveu o uso de inseticidas químicos de contato e ingestão, aplicados via pulverização terrestre ou aérea nas épocas de maior incidência de mariposas e lagartas (Wilson, 2021; Wilson et al., 2022). Inseticidas organofosforados e piretroides foram por muito tempo a base do controle químico da broca (Echeverri-Rubiano et al., 2022; Li et al., 2024). Entretanto, a eficiência desse método é limitada pela biologia da praga após a eclosão, as lagartas rapidamente penetram nos colmos, tornando-se inacessíveis aos produtos aplicados superficialmente se a pulverização não for sincronizada com a janela de vulnerabilidade (ovos e lagartas recém-eclodidas) (Li et al., 2024; Vacari et al., 2025). Além disso, aplicações aéreas podem enfrentar problemas de deriva e cobertura insuficiente em canaviais altos e densos (Zhang et al., 2021; Koo et al., 2024).

Por essas razões, o controle biológico ganhou destaque como alternativa ou complemento ao químico no combate à broca-da-cana. A partir do final da década de 1970 e início dos anos 1980, programas de criação e liberação massal de parasitoides exóticos especializados foram implementados no Brasil com sucesso (Parra et al., 2021; Alves et al., 2024; de Oliveira Cabral et al., 2025). *Cotesia flavipes*, uma vespa endoparasita de larvas de *D. saccharalis*, foi introduzida no Brasil e rapidamente adotada pelas usinas, assim como o parasitoide de ovos *T. galloi*. Atualmente, estima-se que ao ano mais de 3,5 milhões de hectares de canaviais recebam liberações de *C. flavipes* e 3 milhões hectares de *T. galloi* (Parra et al., 2021). Cerca de 90–95% das liberações são feitas por drone durante os períodos de máxima oviposição da praga, de forma a parasitar os ovos ou as lagartas que penetram nos colmos (Parra et al., 2021; Gomes Garcia et al., 2024). Cada fêmea de *C. flavipes* pode parasitar várias

lagartas, inserindo seus ovos dentro do corpo da hospedeira; as larvas do parasitoide se desenvolvem consumindo internamente a lagarta da broca, completando seu ciclo e liberando novas vespinhas no ambiente (Bezerra et al., 2021; Salamanca et al., 2023). Essas estratégias de biocontrole têm mantido as infestações em níveis manejáveis em muitas regiões, reduzindo consideravelmente a necessidade de aplicações químicas contra a broca.

2.3. O controle biológico e o papel de *Xylocoris sordidus*

O controle biológico de pragas na cana-de-açúcar é amplo e envolve parasitoides, predadores e fungos entomopatogênicos (Souza et al., 2023; Vargas et al., 2023; Peć et al., 2024). Conforme já mencionado, *C. flavipes* e *T. galloi* são os pilares do programa de manejo da broca-da-cana no Brasil, atuando sobre ovos e larvas da praga (Alves et al., 2024). Porém, além deles, outras espécies têm importância no agroecossistema dos canaviais, por exemplo, diversas espécies de himenópteros parasitoides nativos e taquinídeos (Diptera) podem atacar *D. saccharalis* em menor escala (Pérez et al., 2021; Gaviria et al., 2024; de Oliveira Cabral et al., 2025). Entre os predadores presentes nos canaviais, destacam-se aranhas, formigas e dermápteros, conhecidos popularmente como “tesourinhas”, que atuam como predadores generalistas, alimentando-se de ovos e pequenas larvas de *Diatraea* spp. (Souza et al., 2023). Esses inimigos naturais contribuem para manter a população da praga sob controle, especialmente em sistemas de manejo mais conservacionistas.

Nesse contexto, é crescente o interesse por organismos predadores que possam ser utilizados de forma aplicada no controle da broca. *Xylocoris sordidus* (Reuter, 1871) é um pequeno percevejo predador pertencente à família Anthocoridae (conhecida como “percevejos-piratas”) (Diniz et al., 2021; Pinto et al., 2022; de Oliveira et al., 2024), que tem sido estudado como potencial agente de biocontrole na canavicultura (Nunes, 2023). Essa espécie nativa é predadora generalista de ovos e outros estágios de insetos, possui coloração escura e tamanho diminuto (3–4 mm), apresenta ciclo de vida curto e alta taxa reprodutiva em laboratório, características desejáveis para criação massal (Vieira et al., 2021; Pinto et al., 2022). Sua dieta preferencial inclui ovos de lepidópteros e

tisanópteros, estudos de laboratório já demonstraram sua eficiência predatória sobre ovos da traça-das-crucíferas *Plutella xylostella* (Dos Santos et al., 2020) e de tripses de amendoim *Enneothrips enigmaticus* (de Oliveira et al., 2024).

Em agroecossistema canavieiro, espera-se que *X. sordidus* possa predação ovos de *D. saccharalis* depositados nas folhas. Nunes (2023) investigou o comportamento de predação de *X. sordidus* sobre ovos de *D. saccharalis*, bem como a sua interação com um parasitoide *T. galloi*, verificando que o predador pode atuar em conjunto com o parasitoide sem prejudicar significativamente a taxa de parasitismo (Nunes, 2023). Isso sugere uma possível estratégia de controle biológico associativo, em que predadores e parasitoides de ovos agem sinergicamente para reduzir a eclosão de lagartas da broca.

Adicionalmente, um aspecto importante do possível uso de *X. sordidus* em programas de MIP é a sua compatibilidade com outras táticas de controle. Nesse sentido, pesquisas vêm investigando a seletividade de métodos de controle sobre o predador. Por exemplo, testes com bioinseticidas à base de *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) demonstraram que as proteínas Cry atuam especificamente sobre as larvas de *D. saccharalis*, sem afetar negativamente o desempenho predatório ou a sobrevivência de *X. sordidus* (Dos Santos et al., 2020). Esses resultados são animadores, pois reforçam a possibilidade de integração de *X. sordidus* em programas de manejo da broca que já fazem uso de *Bt* ou outras ferramentas. Mas, avaliações de seletividade com inseticidas químicos seletivos ou reguladores de crescimento são desejáveis para estabelecer um manejo verdadeiramente integrado. Até o momento, *X. sordidus* tem se mostrado relativamente tolerante a bioinseticidas e possivelmente a certos extratos botânicos (Dos Santos et al., 2020), embora sejam necessários estudos específicos sobre a toxicidade de inseticidas de origem vegetal a esse predador, justamente um dos focos desta tese.

2.4. Inseticidas botânicos no manejo integrado de pragas

Inseticidas botânicos são produtos obtidos de tecidos vegetais ricos em metabólitos secundários com potencial bioativo, capazes de afetar insetos-praga por toxicidade direta, perturbações comportamentais (repelência, deterência alimentar) ou efeitos fisiológicos (inibição do crescimento, interferência

hormonal/ecdise, esterilização) (Usseglio et al., 2022; Lyubenova, 2023; Corzo-Gómez et al., 2024). Na natureza, plantas sintetizam esses compostos como defesa anti-herbivoria (Usseglio et al., 2022; Lyubenova, 2023). Entre as famílias botânicas mais estudadas destacam-se Meliaceae, Asteraceae, Rutaceae e Fabaceae, entre outras (Jyotsna et al., 2024). Esses compostos atuam por múltiplos modos de ação: por exemplo, piretrinas atuam como neurotoxinas de contato modulando canais de sódio voltagem-dependentes (Andersen et al., 2022; Ahamad et al., 2023; Hodoşan et al., 2023), enquanto a azadiractina (nim) é um antialimentar/IGR que interfere na ecdise e em vias endócrinas do inseto (Kilani-Morakchi et al., 2021; Corzo-Gómez et al., 2024).

Em geral, inseticidas botânicos apresentam baixa residualidade e degradação mais rápida que sintéticos, além de maior compatibilidade com inimigos naturais e menor toxicidade a mamíferos, atributos que os tornam atraentes para MIP e produção orgânica (Kilani-Morakchi et al., 2021; Usseglio et al., 2022; Ibrahim e Sammour, 2024). O interesse vem crescendo com a demanda por práticas mais sustentáveis e restrições a moléculas sintéticas persistentes/altamente tóxicas (Usseglio et al., 2022; Awad et al., 2024; Corzo-Gómez et al., 2024; Jyotsna et al., 2024).

No manejo integrado da broca-da-cana, inseticidas botânicos configuram alternativa promissora em programas que buscam reduzir químicos convencionais e preservar o controle biológico com a integração ao MIP (Canazart et al., 2021; Bergamo et al., 2025). Sobre outras pragas, óleos essenciais e extratos de plantas têm mostrado efeitos letais, subletais e antialimentares, que variam conforme o estágio biológico do alvo biológico, a espécie e a concentração/formulação empregada (Usseglio et al., 2022; Fouad et al., 2023; Awad et al., 2024; Ibrahim e Sammour, 2024). Evidências específicas para *D. saccharalis* indicam toxicidade do nim/azadiractina em bioensaios, corroborando o potencial do composto em programas sustentáveis (Souza et al., 2025). Como tendência tecnológica, nano formulações e concentrados emulsionáveis têm sido usados para mitigar volatilidade e aumentar persistência/penetração no dossel, melhorando o desempenho de inseticidas botânicos a campo (Usseglio et al., 2022; Ibrahim e Sammour, 2024).

Quanto à seletividade a organismos benéficos, muitos inseticidas botânicos são menos prejudiciais que os sintéticos de amplo espectro, mas os efeitos subletais/comportamentais podem ocorrer exigindo avaliação caso a caso antes da adoção no MIP (Ochieng et al., 2022; Passos et al., 2022; Parkins et al., 2024). Assim, ao integrar inseticidas botânicos em programas com inimigos naturais, recomenda-se ensaios de compatibilidade e monitoramento de impactos subletais (Passos et al., 2022; Parkins et al., 2024). Para predadores específicos, estudos mostram que certos EOs podem afetar negativamente parâmetros biológicos, reforçando a necessidade de triagem e dose/forma de aplicação adequadas (Caballero-Gallardo et al., 2023).

3. Referências

Abreu Reis M, Marinho CSF, da Silva Nobre IC, de Fraga Dias FMG, Grossi-de-Sá MF, Antonino JD (2025) Distinct biological control agents differentially modulate the immune system of the sugarcane borer larvae (*Diatraea saccharalis*). **Journal of Invertebrate Pathology** 209:108241. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2024.108241>

Acayaba RD, Albuquerque AF, Ribessi RL, Umbuzeiro GA, Montagner CC (2021) Occurrence of pesticides in waters from the largest sugar cane plantation region in the world. **Environmental Science and Pollution Research** 28:9824–9835. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11428-1>

Ahmed N, Alam M, et al. (2022) Botanical insecticides are a non-toxic alternative to conventional pesticides in the control of insects and pests. In: Abdel Farag El-Shafie H (Ed.) **Global decline of insects**. London: IntechOpen, p. 1–18.

Alves RBO, Tomasiello DB, Almeida CM, Rosalen DV, Pereira LH, da Silva HP, Rodrigues CL (2024) Agent-Based Spatial Dynamic Modeling of *Diatraea saccharalis* and the natural parasites *Cotesia flavipes* and *Trichogramma galloi* in sugarcane crops. **Remote Sensing** 16(15):2693. <https://doi.org/10.3390/rs16152693>

Alves RT (2023) Bioinsumos para controle biológico de insetos-praga da cana-de-açúcar. **Revista Cultivar**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/83695100/artigo---bioinsumos-para-controle-biologico-de-insetos-praga-da-cana-de-acucar>. Acesso em: 12 ago. 2025.

Arroyo RM, De Souza JM, Nunes GM, Ramalho DG, De Bortoli SA (2023) *Euborellia annulipes* mortality and predation on *Diatraea saccharalis* eggs after application of chemical and biological insecticides. **Agricultural Sciences** 14(1): 11-22. <https://doi.org/10.4236/as.2023.141002>

Assis HLB, Paiva PEB, Dinardo-Miranda LL, Yamamoto PT (2022) Estimating the relationship of sugarcane borer larvae and yield loss in sugarcane. **Scientia Agricola** 80: e20210274. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0274>

Ayilara MS, Adeleke BS, et al. (2023) Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. **Frontiers in Microbiology** 14:1040901. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1040901>

Bergamo RHS, Daquila BV, Polanczyk RA, Scudeler EL, Conte H (2025) Essential oil of *Citrus aurantium* var. *dulcis*: A new approach to control *Diatraea saccharalis* and *Spodoptera eridania* larvae. **Acta Scientiarum. Agronomy** 48(1):e72850. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v48i1.72850>

Beuzelin J, Huang F, Reagan TE, Stout MJ (2014) *Diatraea saccharalis* (sugarcane stalk borer). **CABI Invasive Species Compendium**. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.18771>

Bezerra JIM, Molter A, Rafikov M, Frighetto DF (2021) Biological control of the chaotic sugarcane borer–parasitoid agroecosystem. **Ecological Modelling** 450:109564. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109564>

Bini AP, Serra MCD, Pastore IF, Brondi CV, Camargo LEA, Monteiro-Vitorello CB, van Sluys M-A, Rossi GD, Creste S (2023) Transmission of *Xanthomonas albilineans* by the spittlebug, *Mahanarva fimbriolata* (Hemiptera: Cercopidae), in Brazil: first report of an insect vector for the causal agent of sugarcane leaf scald. **Journal of Insect Science** 23(6):1160. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iead116>

Bonmatin J-M, Giorio C, Sánchez-Bayo F, van Lexmond MB (2021) An update of the Worldwide Integrated Assessment (WIA) on systemic insecticides. **Environmental Science and Pollution Research** 28:11709–11715. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12853-6>

Braghini A, de Oliveira Lima, et al. (2024) Testing the effects of prey type on the life history and population-level parameters of *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae). **Insects** 15(5):330. <https://doi.org/10.3390/insects15050330>

Canazart, DA, Daquila BV, Schneider LCL, da Silva SV, Gigliolli AAS, Ruvo-Takasusuki MCC, Conte H (2021) Efeito inseticida do óleo essencial de alho em ovos da *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae). **Revista Ibero-Americana De Ciências Ambientais**, 12(7):434–447. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.007.0038>

Capinera JL (2023) Sugarcane borer, *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Insecta: Lepidoptera: Crambidae). **IFAS Extension**. <https://doi.org/10.32473/edis-in374-2001>

Carbognin ÉR, Benedito AS, Ferreira CP, Fernandes OA (2023) Unraveling the effect of temperature and humidity on the life cycle of *Diatraea saccharalis*

(Lepidoptera: Crambidae). **Environmental Entomology** 52(6):1139–1151. <https://doi.org/10.1093/ee/nvad095>

Castilhos RV, Grützmacher AD, Coats JR (2018) Acute toxicity and sublethal effects of terpenoids and essential oils on the predator *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae). **Neotropical Entomology** 47:311–317. <https://doi.org/10.1007/s13744-017-0547-6>

CONAB (2025) Safra 2024/25 de cana-de-açúcar encerra com produção estimada em 676,96 milhões de toneladas. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-2024-25-de-cana-de-acucar-encerra-com-producao-estimada-em-676-96-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 12 ago. 2025.

Corzo-Gómez JC, Espinosa-Juárez JV, Ovando-Zambrano JC, Briones-Aranda A, Cruz-Salomón A, Esquinca-Avilés HA (2024) A Review of botanical extracts with repellent and insecticidal activity and their suitability for managing Mosquito-Borne Disease risk in Mexico. **Plants** 13(9):737. <https://doi.org/10.3390/pathogens13090737>

D'Alessandro V, Cavichioli F (2025) Importância do setor sucroalcooleiro na economia brasileira. **Revista Interface Tecnológica** 21:665–680. <https://doi.org/10.31510/infa.v21i1.1922>

da Silva LCD, Ferreira FIP, Dezoti LA, Nascimento CT, Orikasa C, Takita MA, de Medeiros AH (2022). *Diatraea saccharalis* harbors microorganisms that can affect growth of sugarcane stalk-dwelling fungi. **Brazilian Journal of Microbiology** 53(1):255-265.

Dam MI, Ding B-J, Svensson GP, Wang HL, Melo DJ, Lassance JM, Zarbim PHG, Löfstedt C (2023) Sex pheromone biosynthesis in the sugarcane borer *Diatraea saccharalis*: paving the way for biotechnological production. **Pest Management Science** 80(3):996-1007. <https://doi.org/10.1002/ps.7830>

Danelon AF, Sploador HFS, Bergtold JS (2023) The role of productivity and efficiency gains in the sugar-ethanol industry to reduce land expansion for sugarcane fields in Brazil. **Energy Policy** 172: 113327. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113327>

de Castro RA, de Castro SGQ, Menandro LMS, Kuva MA, Carvalho JLN (2024) Effect of postharvest sugarcane straw amount and herbicides on *Digitaria* spp. control and green cane yield. **Weed Science** 72(5):604-614. <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.45>

de Oliveira SJ, Nascimento VF, de Lacerda LB, de Souza JM, Ramalho DG, Izidro YE, De Bortoli SA (2024). Predator–Prey Interaction Between *Xylocoris sordidus* (Hemiptera: Anthocoridae) and *Enneothrips enigmaticus* (Thysanoptera: Thripidae). **Neotropical Entomology** 53(2):391-399. <https://doi.org/10.1007/s13744-023-01126-1>

de Oliveira Cabral E, dos Santos JÁ, Braghini A, Lima VO, Barbosa EP, Vacari AM (2025) Evaluating field-collected populations of *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae): Enhancing biological traits and flight activity for improved laboratory mass rearing. **Insects** 16(6):571. <https://doi.org/10.3390/insects16060571>

de Souza JM, Nunes GS, de Bortoli SA, Selegim AR, Bento JMS (2022) Predation of *Diatraea saccharalis* eggs and neonates by the earwig *Euborellia annulipes*. **Biological Control** 172:104953. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104953>

Echeverri-Rubiano C, Chica-Ramírez HA, Vargas G (2022) Biology of the most widely distributed sugarcane stem borers, *Diatraea* spp. (Lepidoptera: Crambidae), in Colombia. **Neotropical Entomology** 51:877–885. <https://doi.org/10.1007/s13744-022-00990-7>

Ferreira PHU, Ferreira MC (2023) *Sphenophorus levis* behavior studies: evaluating insect attractiveness or repellency to one insecticide treatment and assessing nocturnal insect activity and location pattern. **Insects** 14(2):205. <https://doi.org/10.3390/insects14020205>

Gallan DZ, Penteriche AB, Henrique MO, Silva-Filho MC (2023) Sugarcane multitrophic interactions: Integrating belowground and aboveground organisms. **Genetics and Molecular Biology** 46:e20220163. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2022-0163>

Gomes Garcia A, Wajnberg E, Parra JRP (2024) Optimizing the releasing strategy used for the biological control of the sugarcane borer *Diatraea saccharalis* by *Trichogramma galloi* with computer modeling and simulation. **Scientific Reports** 14:9535. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60146-y>

Goebel FR, Nikpay A (2017) Integrated pest management in sugarcane cropping systems. In: Rapisarda C, Cocuzza GEM (Eds.) **Integrated pest management in tropical regions**. CABI, p. 113–133. <https://doi.org/10.1079/9781780648002.0113>

Hernández-García V, Osorio-Osorio R, Hernández-Hernández LU, Márquez-Quiróz C, Cruz-Lázaro EDL, Aguirre-Uribe LA (2015) Damage by *Diatraea saccharalis* (Fabricius) to sugarcane at La Chontalpa, Tabasco, México. **Southwestern Entomologist** 40:493–496. <https://doi.org/10.3958/059.040.0306>

Ibrahim SS, Sammour EA (2024) valuating the persistence and insecticidal effects of emulsifiable concentrate containing *Cananga odorata* essential oil on survival and enzymatic activity of *Spodoptera littoralis*. **Phytoparasitica** 52:85. <https://doi.org/10.1007/s12600-024-01199-7>

Jyotsna B, Patil S, Prakash YS, Rathnagiri P, Kishor PK, Jalaja N (2024) Essential oils from plant resources as potent insecticides and repellents: Current

status and future perspectives. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology** 61:103395. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103395>

Kilani-Morakchi S, Morakchi-Goudjil H, Sifi K (2021) Azadirachtin-Based Insecticide: Overview, risk assessments, and future directions. **Frontiers in Agronomy** 3:676208. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.676208>

Li A-M, Chen Z-L, et al. (2024) Sugarcane borers: species, distribution, damage and management options. **Journal of Pest Science** 97:1171–1201. <https://doi.org/10.1007/s10340-024-01750-9>

Lima APS, Santana EDR, et al. (2020) Insecticide activity of botanical compounds against *Spodoptera frugiperda* and selectivity to the predatory bug *Podisus nigrispinus*. **Crop Protection** 136:105230. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105230>

Liu X, Kwon H, Wang M, O'Connor D (2023) Life cycle greenhouse gas emissions of Brazilian sugar cane ethanol evaluated with the GREET model using data submitted to RenovaBio. **Environmental Science & Technology** 57(32):11814–11822. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08488>

Lyubenova A, Georgieva L, Antonova V (2023) Utilization of plant secondary metabolites for plant protection. **Biotechnology & Biotechnological Equipment** 37(1):1–20. <https://doi.org/10.1080/13102818.2023.2297533>

Marins ÉFC, da Silva MJS, da Silva JL, Silva-Cabral JRA, Costa JFO, Feijó FM, Assunção IP, Lima GSA (2022) *Colletotrichum* species associated with sugarcane red rot in Brazil. **Fungal Biology** 126(4):290-299. <https://doi.org/10.1111/ppa.13597>

Mehdi F, Cao Z, et al. (2024) Factors affecting the production of sugarcane yield and sucrose accumulation: suggested potential biological solutions. **Frontiers in Plant Science** 15:1374228. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1374228>

Msomba BH, Ndaki PM, Joseph CO (2024) Sugarcane sustainability in a changing climate. **Frontiers in Agronomy** 6:1423233. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1423233>

Nunes LS (2023) **Comportamento de predação de *Xylocoris sordidus* com ovos de *Diatraea saccharalis* e *Corcyra cephalonica* parasitados e não parasitados por *Trichogramma galloi***. Trabalho de Conclusão (Ciências Biológicas), FCAV-Unesp, Jaboticabal, SP.

Ochieng LO, Ogendo JO, et al. (2022) Field margins and botanical insecticides enhance *Lablab purpureus* yield by reducing aphid pests and supporting natural enemies. **Journal of Applied Entomology** 146(7): 838-849. <https://doi.org/10.1111/jen.13023>

Panis C, Kawassaki ACB, et al. (2022) Evidence on human exposure to pesticides and the occurrence of health hazards in the Brazilian population: a

systematic review. **Frontiers in Public Health** 9:787438. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.787438>

Parra JRP, Coelho Jr. A (2022) Insect rearing techniques for biological control programs, a component of sustainable agriculture in Brazil. **Insects** 13(1):105. <https://doi.org/10.3390/insects13010105>

Passos LC, Ricupero M, et al. (2022) Sublethal effects of plant essential oils toward the zoophytophagous mirid *Nesidiocoris tenuis*. **Journal of Pest Science** 95(4), 1609-1619. <https://doi.org/10.1007/s10340-022-01548-7>

Peč M, Salazar-Mendoza P, Magalhães DM, Delalibera Jr I, Bento JSM (2024) The endophytic entomopathogenic fungus *Metarhizium robertsii* alters sugarcane plant defenses, reducing *Diatraea saccharalis* oviposition and enhancing the attraction of *Cotesia flavipes*. **Crop Protection** 184:106872. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106872>

Poorniammal R, Jernisha J, Prabhu S, Dufossé L (2024) Sugarcane Pokkah Boeng disease: insights and future directions for effective management. **Life** 14(12):1533. <https://doi.org/10.3390/life14121533>

Puentes-Cala E, Atehortúa-Bueno M, Tapia-Perdomo V, Navarro-Escalante L, Hernández-Torres J, Castillo-Villamizar G (2023) First insights into the gut microbiome of *Diatraea saccharalis*: From a sugarcane pest to a reservoir of new bacteria with biotechnological potential. **Frontiers in Ecology and Evolution** 11:1027527. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1027527>

Robles-Pérez R, Isiordia-Aquino N, Ávila-Rodríguez BR, Castillo-Colindres AA, Vejar-Cota G, Solis MA, Cortez-Isiordia KA (2024) First report of *Diatraea impersonatella* (Lepidoptera: Crambidae) on sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in Honduras. **Florida Entomologist** 107(1): 20240009.

Rossi LM, Gallo JMR, Mattoso LHC, Buckeridge MS, Licence P, Allen DT (2021) Ethanol from sugarcane and the Brazilian biomass-based energy and chemicals sector. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering** 9(12):4293–4295. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01678>

Ruths JC, Shikida PFA, Fracarolli IFL (2023) Rural work in the sugarcane sector and its influences on workers' health. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho** 21(1):e2023779. <https://doi.org/10.47626/1679-4435-2023-779>

Sajid Z, da Silva MAB, Danial SN (2021) Historical analysis of the role of governance systems in the sustainable development of biofuels in Brazil and the United States of America (USA). **Sustainability** 13(12):6881. <https://doi.org/10.3390/su13126881>

Saldanha CB, Silva DT, Martins LOS, Fraga ID, Silva MS (2024) Sustainability of the origin indication of sugar cane spirit from Abaíra Microregion, Bahia, Brazil under the aegis of the Sustainable Development Goals (SDGs). **Sustainability** 16(24):10880. <https://doi.org/10.3390/su162410880>

Salamanca LM, Echeverri-Rubiano C, Rondón M, Manzano MR, Sarmiento CE, Michaud JP, Vargas G (2023) Divergent life histories between wild and commercially-sourced *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) parasitizing four species of *Diatraea* (Lepidoptera: Crambidae). **Biological Control** 178:105144. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105144>

Salvatore A, García MB, Romero E, Willink E (2010) Sugar losses caused by the sugarcane borer (*Diatraea saccharalis*) in Tucumán, Argentina. **Proceeding International Society Sugarcane Technologist** 27:2010.

Sánchez-Bayo F, Tennekes HA (2020) Time-cumulative toxicity of neonicotinoids: experimental evidence and implications for environmental risk assessments. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 17(5):1629. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051629>

Santiago AD, Rossetto R (2010) **Controle biológico da broca da cana-de-açúcar**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 48 p. (Documentos, 287).

Santos-Cividanes TM, Cividanes FJ, Barbosa JC (2021) Silicon induces resistance to *Diatraea saccharalis* in sugarcane and it is compatible with the biological control agent *Cotesia flavipes*. **Journal of Pest Science** 95:783–795. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01429-5>

Silva FR, Resende MLVD, Ferreira LC, Adesina O, Xavier KV (2024) Molecular characterization and pathogenicity of *Colletotrichum falcatum* causing red rot on sugarcane in Southern Florida. **Journal of Fungi** 10(11):742. <https://doi.org/10.3390/jof10110742>

Silva TC, Moreira SI, et al. (2023) Dry rot caused by the complex *Colletotrichum falcatum* and *Thielaviopsis paradoxa* emerges as a key stalk disorder in Northwestern São Paulo, Brazil. **Agronomy** 13(11):2729. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112729>

Taguti PS, Ramalho DG, Nascimento VF, De Bortoli SA (2023) Chemical and biological products used in sugarcane and their effect on *Trichogramma galloi*. **Entomologia Experimentalis et Applicata** 171(10):e13363. <https://doi.org/10.1111/eea.13363>

Tlak Gajger I, Dar SA (2021) Plant allelochemicals as sources of insecticides. **Insects** 12(3):189. <https://doi.org/10.3390/insects12030189>

Usseglio VL, Dambolena JS, Zunino MP (2022) Can Essential oils be a natural alternative for the control of *Spodoptera frugiperda*? A Review of toxicity methods and their modes of action. **Plants** 12(1):3. <https://doi.org/10.3390/plants12010003>

Vacari AM, dos Santos JA, Oliveira Cabral E de, Queiroz KS de, Alves FB, Oliveira Lima V de, Braghini A (2025) The functional response of the predator *Chrysoperla externa* to *Diatraea saccharalis* is influenced by the developmental

stage of its prey. **CABI Agriculture and Bioscience** 6(1):0053.
<https://doi.org/10.1079/ab.2025.0053>

Vieira NF, Santos NA, Pinto MM, De Bortoli SA (2021) Sistema de criação de duas espécies de percevejos predadores do gênero *Xylocoris* Dufour, 1831 e da presa alternativa *Corcyra cephalonica* (Stainton, 1866) (Lepidoptera: Pyralidae). **Entomological Communications** 3:ec03012-ec03012.
<https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec03012>

Wilson BE (2021) Successful integrated pest management minimizes the economic impact of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) on the Louisiana sugarcane industry. **Journal of Economic Entomology** 114(1):468–471. <https://doi.org/10.1093/jee/toaa246>

Wilson BE, Salgado LD, Villegas JM (2022) Optimizing chemical control for *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) in sugarcane. **Crop Protection** 152:105843. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105843>

Wilson BE, White WH, Richard RT, Johnson RM (2020) Population trends of the sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae) in Louisiana sugarcane. **Environmental Entomology** 49(6):1455–1461.
<https://doi.org/10.1093/ee/nvaa127>

Wiesberg IL, de Medeiros JL, Paes de Mello RV, Santos Maia JGS, Bastos JBV, de Queiroz F. Araújo O (2021) Bioenergy production from sugarcane bagasse with carbon capture and storage: Surrogate models for techno-economic decisions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 150:111486.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111486>

Xavier GG, Farias ES, et al. (2024) Determining factors and economic injury levels for *Sphenophorus levis* for chemical and biological control in irrigated and non-irrigated sugarcane crops. **Neotropical Entomology** 53:955–963.
<https://doi.org/10.1007/s13744-024-01175-0>

Zanetti R, Sanches JJ, Wenzel AVA, Haddi K, Ferreira H, Santos LV (2024) Isocycloseram: A new active ingredient for leaf-cutting ants control. **PLoS ONE** 19(5):e0300187. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300187>

CAPÍTULO 2: Insecticidal activity of plant-derived compounds against *Diatraea saccharalis* Fabr. (Lepidoptera: Crambidae)¹

Abstract

Damage caused by *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) significantly compromised sugarcane yield. Traditional pest control relies on the application of synthetic insecticides and use of parasitoids, which has encouraged the search for more selective and biologically compatible alternatives. This study evaluated the insecticidal activity of thymol, carvacrol, and 1,8-cineole on eggs and larvae under laboratory and greenhouse conditions. In the laboratory, carvacrol was the most effective compound, with an LC_{50} of 2.20 mg/L for larvae and 100% embryonic inviability at 5.0 mg/L. Thymol showed an LC_{50} of 9.60 mg/L for larvae and also resulted in 100% ovicidal action at 5.0 mg/L. 1,8-cineole presented an LC_{50} of 4.43 mg/L for larvae, but a lower effect on eggs, with 47.6% inviability at a concentration of 8.0 mg/L. In the greenhouse, carvacrol and thymol maintained high ovicidal efficacy (89.25% and 98.43%, respectively, while 1,8-cineole showed an efficacy of 60.76%, highlighting the influence of environmental factors on its persistence and performance. These results reinforce the potential of these compounds as alternatives for the management of *D. saccharalis*, with an emphasis on carvacrol and thymol, and indicate the need for further studies on their formulations, stability, and field applications.

Keywords: sugarcane, sugarcane borer, botanical insecticides, thymol, carvacrol, 1,8-cineole.

Statements and Declarations

Competing Interests: The authors declare that they have no conflict of interest.

Funding: This research was funded by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) in partnership with Usina São Martinho S/A and São Paulo State University.

1. INTRODUCTION

Diatraea saccharalis (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae), known as the sugarcane borer, is a key pest in sugarcane (*Saccharum* spp.) cultivation and other grasses (de Oliveira et al. 2022; García

¹ Este capítulo corresponde ao artigo científico submetido à revista Sugar Tech e encontra-se em avaliação para publicação.

Degano et al. 2024; Fernandes Souza et al. 2023; Rocha et al. 2024). Its geographic distribution is broad, ranging from the southern United States to southern Argentina (Francischini et al. 2019; Wilson, 2021; Fogliata et al. 2022). In addition to *D. saccharalis*, other species of the genus *Diatraea* are also known as sugarcane borers and occur throughout the Americas, most notably *Diatraea tabernella* Dyar, 1911 and *Diatraea impersonatella* (*flavipennella*) (Walker, 1863) (De Freitas et al. 2007; Solis and Metz 2016; Atencio et al. 2017). However, *D. saccharalis* is the main species associated with sugarcane cultivation in Brazil and occurs in virtually all cane-producing regions of the country (Francischini et al. 2017).

Neonate larvae of *D. saccharalis* feed on the leaf parenchyma and sheaths of sugarcane. From the second instar onward, they bore into the stalks and feed on internal tissues, forming tunnels that compromised the transport of water and nutrients, reduced biomass accumulation, and harmed plant development, resulting in negative impacts on the productivity and quality of sucrose (Salvatore et al. 2010; Rossato et al. 2013; Hernández-García et al. 2015; Tomaz et al. 2018; Li et al. 2024). This damage not only reduces the quantity and quality of available raw material but also facilitates fungal infections, which in turn can invert sucrose and contaminate the cane juice, resulting in significant economic losses (Rossato et al. 2013; Gallan et al. 2023).

It is estimated that infestation by the sugarcane borer can result in a loss of 0.25% in sugar production and 0.20% in alcohol production for every 1% of infestation, which is equivalent to a reduction of approximately 620–650 g of sugar per ton of sugarcane, depending on the variety (Salvatore et al. 2010; Francischini et al. 2017). In addition, the quality of cane juice is reduced by 5.6% to 5.8% in purity, which directly affects the amount of recoverable sucrose (Salvatore et al. 2010), highlighting the importance of effective pest control strategies to mitigate these impacts.

In this context, Integrated Pest Management (IPM) in sugarcane cultivation combines several strategies for controlling the sugarcane borer, including biological control, the use of resistant cultivars, and the application of chemical insecticides (Pimentel et al. 2017; Laranjeira Rôdas et al. 2019; Silva et al. 2020; Daquila et al. 2021; Santos et al. 2022; Wilson et al. 2022; Budeguer et al. 2024; García Degano et al. 2024; Abreu Reis et al. 2025), and the adoption of these practices has significantly contributed to a reduction in *D. saccharalis* populations over the last few decades (Wilson et al. 2020; Wilson et al. 2022). In addition to these strategies, the evolution of chemical insecticides has been fundamental to pest control, with new molecules having less impact on the environment and non-target organisms (Isman 2015; Sparks et al. 2019). These insecticides, such as neonicotinoids, spinosyns, bisacylhydrazines, and oxadiazines, tend

to be more compatible with bioinsecticides and, therefore, with IPM (Tomizawa and Casida 2005; Isman 2015; Kopparthi 2020; Sparks et al. 2019; Sain et al. 2022). However, some studies have indicated significant adverse effects on non-target organisms, especially natural enemies and pollinators, raising questions about their selectivity and compatibility with IPM programs (Prabhaker et al. 2011; Biondi et al. 2012; Sánchez-Bayo and Tennekes, 2020; Bonmatin et al. 2021).

A promising source of new sustainable molecules for pest control is plants, whose bioactive compounds can help reduce dependence on synthetic insecticides, which pose higher environmental and human health risks than molecules of botanical origin (Souto et al. 2021; Tlak Gajger and Dar 2021; Ayilara et al. 2023). Regarding compatibility, these molecules tended to integrate better with other IPM strategies (Usha et al. 2014; Reddy and Chowdary 2021) as they exhibit insecticidal and/or repellent activity against pests, combined with selectivity and lower toxicity for many non-target organisms (Castilhos et al. 2018; Luna-Cruz et al. 2018; Lima et al. 2020; Ahmed et al. 2022).

The bioactive compounds in plants, derived from secondary metabolism, act as natural chemical defense mechanisms against phytophagous insects (Bennett and Wallsgrove 1994; Spletozer et al. 2021; Divekar et al. 2022). They can act on metabolic and hormonal pathways, causing disruptions in hormone production or secretion, and affect neurophysiological systems, such as the cholinergic (acetylcholine), GABAergic (GABA), and octopaminergic (octopamine) systems, resulting in behavioral and physiological dysfunctions in insects. Furthermore, they can exert antifeedant and growth-regulating effects, thereby compromising development and survival (Rattan 2010; Regnault-Roger et al. 2012; Oguh et al. 2019; Divekar et al. 2022). Another important mechanism is repellency, through which botanical compounds induce insects to evade or avoid the treated area, thereby reducing oviposition, feeding, and contact with the host plant (Conboy et al., 2020; Lo Pinto et al., 2022; Farag et al., 2024; Jyotsna et al., 2024). On the other hand, some plant volatile compounds can also act as attractants, being used to direct insects to traps or places treated with control agents, favoring integrated management strategies such as "attract-and-kill" (Pickett and Khan, 2016; Tamiru and Khan, 2017; Bouwmeester et al., 2019; Qian et al., 2024; Yang and Song, 2024).

Given the diversity of the observed mechanisms of action, it is also important to understand the extraction methods and the main compounds responsible for these insecticidal activities. They can be extracted from various plant tissues, such as leaves, stems, roots, and fruits, in the form of extracts, essential oils, powders, or even through the isolation of compounds (Koma Okwute 2012; Bolouri et al. 2022; Reis

et al. 2023). The main compounds with insecticidal activity are monoterpenes (such as carvacrol, thymol, limonene, linalool, and 1,8-cineole), phenols (such as eugenol), aldehydes (such as citral and cinnamaldehyde), and secondary metabolites (such as estragole and anethole), which have been widely reported in the literature for their effectiveness against different insect pests, including dipterans, hemipterans, and lepidopterans (Chang et al. 2009; Pavela and Benelli 2016; Almadiy 2020; Wandjou et al. 2022; Pavela and Novák 2024). The isolation of these compounds is particularly noteworthy as it increases insecticidal efficacy, allows for standardization of the active substance, and facilitates large-scale industrial production, making bioinsecticides more viable for commercial use.

Among these isolated compounds, thymol, carvacrol, and 1,8-cineole have been widely studied and are known for their insecticidal properties against several pest species. Studies have reported their effectiveness on both hemipteran and lepidopteran pests, demonstrating toxic, physiological, and behavioral effects (Dias et al., 2019a; Dias et al., 2019b; Kumrungsee et al., 2014; Ebadollahi et al., 2022). Considering their broad bioactivity and potential as alternatives to synthetic insecticides, this study aimed to evaluate the insecticidal activity of three botanically derived compounds (thymol, carvacrol, and 1,8-cineole) on *Diatraea saccharalis*, by determining the mortality of second-instar larvae (LC₅₀ and LC₉₀) under laboratory conditions and the ovicidal action, both in the laboratory and in a greenhouse.

2. METHODS

The experiments were conducted using the facilities of the Laboratory of Biology and Insect Rearing (LBCI), belonging to the Faculty of Agrarian and Veterinary Sciences of São Paulo State University (UNESP), Jaboticabal Campus, São Paulo, Brazil. Environmental conditions were controlled during the laboratory bioassays, with the temperature maintained at 25 ± 2 °C, relative humidity at $70 \pm 10\%$, and photoperiod of 12 h of light and 12 h of darkness.

2.1. Acquisition and Maintenance of Insects

Eggs (ovipositions) of *D. saccharalis* were obtained from a colony maintained by the biofactory of Usina São Martinho S/A, located in Pradópolis, São Paulo, Brazil. The colonies were maintained following the protocol established by Vacari et al. (2012). The ovipositions were kept at a controlled temperature (25 °C) in a BOD incubator until larval hatching, when they were transferred to an artificial

diet adapted from Hensley and Hammond Jr. (1968) until they reached the second instar stage for use in bioassays.

2.2. Management of plants in the greenhouse

The sugarcane plants were cultivated in a greenhouse under natural environmental conditions. Pre-sprouted seedlings (PSS) of the RB005014 variety, supplied by Usina São Martinho S/A (Pradópolis, SP, Brazil), were established in a protected environment and managed according to health and vegetative development criteria.

The plants were grown in plastic pots with a capacity of 5 liters (Sura Comercial, São Paulo, SP, Brazil), filled with a substrate composed of soil, washed sand, and organic matter in a 3:2:1 ratio (v:v:v). Irrigation was performed manually using sprinklers, activated three times a day, with the goal of maintaining moisture levels suitable for crop development. After approximately 120 d of cultivation, the plants were considered ready for the experimental treatments.

2.3. Reagents

All botanical compounds used in the study were purchased from Quinarí (Ponta Grossa, PR, Brazil) in the form of pure substances of analytical grade (>99% purity). Thymol was obtained as crystals, whereas carvacrol and 1,8-cineole were available as liquids. Dimethyl sulfoxide (DMSO), purchased from Sigma-Aldrich (Saint Louis, MO, USA), with analytical purity greater than 99%, was used as a solvent to facilitate the dissolution of the compounds, especially those with low solubility in water. The solutions were magnetically stirred (Fisatom, São Paulo, SP, Brazil) for approximately 5 min. For thymol, heating to 40 °C was necessary to ensure complete emulsification of the crystals.

2.4. Evaluation of larvicidal and ovicidal activity in the laboratory

The larvicidal activity of the compounds was evaluated on second-instar larvae of *D. saccharalis*, previously identified based on their recent molt from the first instar, as indicated by the presence of exuviae and characteristic body size. For carvacrol and 1,8-cineole, 10 concentrations were tested, ranging from 0.05 mg/L to 50.0 mg/L, whereas 15 concentrations were required for thymol, ranging from 0.05 mg/L to 70.0 mg/L. The selection of these concentration ranges was based on preliminary pretests conducted to estimate the appropriate lethal levels for each compound. All concentrations were prepared by dissolving

the compounds in 1.0 mL of dimethyl sulfoxide (DMSO) and subsequently diluting them in deionized water. The negative control consisted of 1.0% dimethyl sulfoxide (DMSO) in deionized water. One hundred larvae were tested for each treatment.

For statistical analyses, only biologically relevant concentrations were considered, excluding those that resulted in 100% mortality (except for the lowest concentration that produced this effect) and those that caused no mortality (with the exception of the lowest concentration tested) (Akçay, 2013). Similarly, for the LC₅₀ tests, the concentrations with very low mortality were disregarded.

For exposure to the treatments, the larvae were initially placed in Petri dishes (9.0 cm in diameter × 1.5 cm in height) and then treated with the different concentrations of the extracts, using a Potter Tower (Burkard Manufacturing, Rickmansworth, Herts, United Kingdom) calibrated at 34.5 kPa to uniformly apply 2.0 mL of the solution. After application, the larvae were transferred to acrylic plates (6.0 cm in diameter), with five larvae per plate and 20 plates per treatment. Each plate received a small portion of artificial diet placed in the center, prepared according to the methodology previously described in the section “Acquisition and Maintenance of Insects.” The plates were sealed with PVC film (Facilita, Grupo EBEG, Ribeirão Preto, SP, Brazil) and kept under controlled environmental conditions (temperature, 25 ± 2 °C; relative humidity, 60 ± 10%; photoperiod, 12 h light: 12 h dark). Larval mortality was observed after 24, 48, and 72 h.

Ovicidal activity was evaluated using two-day-old egg masses of *D. saccharalis*, each containing approximately 50 eggs, with 30 replicates performed for each concentration of carvacrol, 1,8-cineole, and thymol (2, 5, and 8 mg/L, respectively, diluted in deionized water containing 1% DMSO). The negative control consisted of deionized water containing 1% DMSO. Egg masses were submerged in the solutions for 1 min and then left to dry for 2 h in an Air Circulation Chamber (Veco, Campinas, SP, Brazil). Afterwards, they were placed in Petri dishes (9.0 cm diameter × 1.5 cm height) containing a moistened cotton ball to maintain humidity. The dishes were kept in a BOD incubator (Eletrolab, São Paulo, SP, Brazil) under controlled temperature (25 ± 2 °C), relative humidity (60 ± 10%), and photoperiod (12 L:12D). Egg viability was assessed after 72 hours under a stereomicroscope (Stemi DV4, Carl Zeiss, Oberkochen, Germany) which is the period required for hatching after treatment. Eggs that hatched and those that remained intact were counted to calculate the mean egg viability and ovicidal efficiency for each treatment.

2.5. Evaluation of ovicidal activity in a greenhouse

The ovicidal activity of the botanical compounds was evaluated in a greenhouse using sugarcane plants (*Saccharum* spp.) approximately four months old, grown individually in pots as previously described in the section “Plant management in the greenhouse.” For each treatment, 15 pots were used, with three selected leaves per pot, totaling three subreplicates per experimental unit.

On each leaf, two-day-old egg masses of *D. saccharalis*, each containing about 50 eggs, were manually affixed using metal staples applied with a stapler (Bates 550, The Bates MFG CO., Orange, NJ, USA), to ensure the adhesion of the egg masses to the leaf surface without compromising their integrity. The leaves containing the eggs were wrapped with voile fabric (Cortex, Americana, SP, Brazil), as illustrated in Figure 1, to prevent the loss of egg masses and minimize interference from external agents. The treatments were applied using a manually operated sprayer (0NT; Eda, São Paulo, SP, Brazil) with direct topical spraying onto the eggs.

The tested concentrations of carvacrol, 1,8-cineole, and thymol were determined based on the estimated CL_{95} for second instar larvae in this same experiment, since the methodological approach calls for the use of a single operational dose for all target stages. This choice is justified by the practical infeasibility of carrying out separate applications for eggs and larvae under field conditions, as well as technical limitations related to the fixation and recalculation of larvae after foliar application. Thus, the experimental model was designed to simulate the deposition of the compound on eggs and its residual potential on the leaf surface.

The solutions were prepared in deionized water containing 1% dimethyl sulfoxide (DMSO). The negative control consisted of deionized water containing 1% DMSO. After application, the plants remained in the greenhouse for 72 h, a period sufficient for natural hatching of the eggs, at ambient temperatures ranging from 18 °C to 35 °C. During the experiment, the plants were irrigated by sprinkling three times per day.

At the end of 72 h, the eggs were examined under a stereoscopic magnifier, and those that hatched and those that remained intact were counted. Based on these data, the average egg viability and ovicidal efficiency for each treatment were calculated.

2.6. Statistical Analysis

The mortality data from the toxicity tests for *D. saccharalis* larvae were transformed using the arcsine square root ($x + 1$) and subjected to analysis of variance (ANOVA), and means were compared using the Scott-Knott test ($p < 0.05$). To determine toxicity regression, LC_{50} and LC_{90} , Probit analysis was used with 95% confidence intervals.

Egg viability (%) was determined as the proportion of hatched eggs in relation to the total number of eggs evaluated using the following formula:

$$\text{Egg viability (\%)} = \left(\frac{\text{Total number of eggs}}{\text{Number of hatched eggs}} \right) \times 100$$

The ovicidal effect (%) of each treatment was calculated using the following formula, adapted from Abbott (1925):

$$\text{Ovicidal effect (\%)} = \left(1 - \frac{\text{Egg viability in the control}}{\text{Egg viability in the treatment}} \right) \times 100$$

Egg viability values were subjected to ANOVA, and when significant, means were compared using Tukey's test at a 5% probability level. All statistical analyses were conducted using SAS OnDemand for Academics software (SAS Institute, Cary, NC, United States).

3. RESULTS

3.1. Larvicidal and ovicidal effects in the laboratory

There was a significant difference in larval mortality between the control and all botanical compounds tested in the evaluations conducted 24, 48, and 72 h after application. In the case of carvacrol (Figure 2), *D. saccharalis* mortality increased with concentration ($F = 431.49$; $p < 0.0001$), with a dose of 25.6 mg/L resulting in total mortality within 24 h, whereas intermediate concentrations (3.2 to 12.8 mg/L) reached between 60% and 87% after 72 h. Conversely, concentrations of 0.1 to 0.8 mg/L did not differ significantly from the control.

1,8-cineole (Figure 3) was also effective, with significantly higher mortality compared to the control ($F = 272.77$; $p < 0.0001$), and its effect increased over time, reaching 100% and 94% at concentrations of 25.6 and 12.8 mg/L, respectively, after 72 h. On the other hand, concentrations of 0.1 to 0.4 mg/L showed no statistical differences from the control.

A similar pattern was observed with thymol (Figure 4), with increasing toxicity according to concentration and exposure time ($F = 493.54$; $p < 0.0001$). The three highest concentrations resulted in mortality above 89% after 72 h, whereas the lowest concentrations did not differ from the control.

Based on the probit analysis, the LC_{50} and LC_{90} values indicated differences in toxicity among the compounds tested (Table 1). Carvacrol showed the lowest LC_{50} (2.20 mg/L) and LC_{90} (14.62 mg/L), followed by 1,8-cineole with an LC_{50} of 4.43 mg/L and LC_{90} of 22.63 mg/L, and thymol with LC_{50} of 9.60 mg/L and LC_{90} of 28.55 mg/L, highlighting the greater effectiveness of carvacrol in terms of lethality. Additionally, the angular coefficients varied among the compounds, being highest for thymol (2.70 ± 0.23), suggesting a steeper dose-response curve. The goodness-of-fit tests for the probit model demonstrated a satisfactory fit for all substances according to the chi-square (χ^2) values and their respective degrees of freedom (df).

In the assessment carried out 72 hours after the application of treatments on the eggs of *D. saccharalis* (Figure 5), the results showed a significant difference ($F = 169.47$; $p < 0.0001$) compared to the control, both in terms of viability and embryonic development (ovicidal action), with a significant reduction in the number of viable eggs at the tested concentrations of carvacrol and at the 5.0 and 8.0 mg/L concentrations of thymol. At these concentrations, mortality rate exceeded 95%. In the case of 1,8-cineole, although mortality was relatively low, it was still higher than that of the control, with the 8.0 mg/L concentration reaching 47.6%.

3.2. Ovicidal effect in greenhouse conditions

Egg masses were re-evaluated 72 h after the application of treatments to *D. saccharalis* eggs (Figure 6), and significant statistical differences were observed between treatments regarding egg viability ($F = 318.52$; $p < 0.0001$), reflecting the ovicidal effect of the evaluated substances. The highest mean viability was recorded in the control (DMSO) at 84.96%, which was statistically different from that of all other treatments. Thymol presented the most pronounced effect, with egg viability reduced to only 1.33%, corresponding to an ovicidal efficiency of 98.43%. Carvacrol also showed high efficiency, with a mean viability of 9.13% and an ovicidal efficacy of 89.25%.

Although 1,8-cineole caused lower mortality than the other botanical compounds, it still significantly reduced egg viability (33.34%) compared to the control, achieving an ovicidal efficiency of 60.76%. These results indicate that both thymol and carvacrol, under the tested conditions, have a high

potential to inhibit the hatching of *D. saccharalis* eggs, while 1,8-cineole displayed an intermediate ovicidal effect.

4. DISCUSSION

In this study, the lethal effects of three botanical compounds were evaluated at different concentrations based on pretests for *D. saccharalis* at the egg and larval stages. Laboratory results showed that the concentrations required to reduce egg viability by more than 90% were significantly lower than those required to kill the same percentage of larvae. This was evident in the treatments with Carvacrol and Thymol, where 5.0 mg/L was sufficient to render 100% of the eggs inviable, while higher doses, such as 25.6 mg/L, were required for the larvae. This result can be attributed to the presence of small pores (aeropyles) in the exochorion of the *D. saccharalis* eggs (Cônsoli et al. 1999). These pores are responsible for oxygenating the inner parts of the eggs and may facilitate the penetration of certain toxic substances depending on their chemical affinity with the components of the membrane (Beament et al. 1952; Gautan et al. 2014; Bomfim et al. 2017; Dias et al. 2019a).

However, when the botanical compounds were applied to eggs in a greenhouse setting, a significant reduction in ovicidal performance was observed compared to the laboratory data. This difference may be related to the partial degradation of the compounds in a semi-open environment, where factors such as solar radiation, temperature variations, and fluctuations in relative humidity affect the stability, persistence, and absorption of the compounds on the leaf surface, thereby reducing the effective exposure time of the embryos to the active ingredient (Lichiheb et al. 2016; Lyons et al. 2021; Hua et al. 2024). Especially for molecules of botanical origin, which are more susceptible to volatilization, photodegradation, and thermal degradation, these environmental factors can accelerate their dissipation, compromising absorption by the eggs and, consequently, their ovicidal efficacy (Iqbal et al. 2021; Daraban et al. 2023; Qasim et al. 2024).

In the case of 1,8-cineole, the doses tested in the laboratory were insufficient to achieve 50% embryonic mortality (ovicidal action), possibly because of its chemical structure. 1,8-cineole is a terpene widely found in essential oils from species of the genus *Eucalyptus* (Seol and Kim 2016; Dhakad et al. 2018; Mączka et al. 2021; Danna et al. 2024), and its low solubility in water, greater affinity for organic solvents, and its lipophilic characteristics may reduce its interaction with the components of the egg membrane, hindering penetration and compromising its ovicidal action (Hąc-Wydro et al. 2017; Sarma et

al. 2019). Although other researchers have observed the ovicidal effect of 1,8-cineole or its derivatives from *Eucalyptus* essential oils, the doses used were significantly higher than those employed in this study, which supports the hypothesis of this research (Macedo et al. 2009; Maciel et al. 2010; Ribeiro et al. 2016). This limitation became even more evident in greenhouse trials, where the ovicidal efficacy of 1,8-cineole was significantly lower than that observed in the laboratory, probably because of the high volatility and rapid dissipation of terpenes on the leaves, which compromises the maintenance of sufficiently toxic levels for a prolonged period (Barton et al. 2014).

However, 1,8-cineole demonstrated a high larval mortality rate, being the second most toxic compound for larvae after 72 h, suggesting that its action may be more effective in developmental stages with less structural protection, where it can penetrate the cuticle and reach the hemolymph (Altaf et al. 2024). Locatelli et al. (2006) observed a similar pattern of efficacy in *Plodia interpunctella* (Hübner, 1813) (Lepidoptera: Pyralidae) and Maciel et al. (2010) in *Lutzomyia longipalpis* (Lutz & Neiva, 1912) (Diptera: Psychodidae), with greater susceptibility to larvae than to eggs.

A possible explanation for the larvicidal effects of 1,8-cineole is its volatility, which provides not only contact action, but also a fumigant effect (Sfara et al. 2009; Omara et al. 2018; Kheloul et al. 2021; Karabörklü and Ayvaz 2023), with its contact mode involving penetration through the cuticle, which disrupts cellular metabolism and interferes with neurotransmission. This substance inhibits acetylcholinesterase, prolongs neuronal signaling, modulates GABA receptors, reduces motor coordination, and affects the octopaminergic system, compromising vital functions of insects, leading to paralysis and, consequently, death (Jankowska et al. 2017). These mechanisms of action help explain the differences in toxicity among the tested compounds, and the results obtained for carvacrol, 1,8-cineole, and thymol reinforce the need to consider the specificity of each substance for insect eggs and larvae.

Carvacrol was the most lethal to embryos and larvae after 72 h in the laboratory, with mortality rates increasing during the evaluation period. Its ovicidal and larvicidal effects have been reported in other studies (Tabari et al. 2017; Dias et al. 2019a; Youssefi et al. 2019; Gong et al. 2020; Liu et al. 2023; Ouabou et al. 2024). The insecticidal effects observed in *D. saccharalis* are explained in part by Jankowska et al. (2017), which indicate that carvacrol acts as an acetylcholinesterase inhibitor, prolonging nerve signaling in insects, as well as modulating GABA receptors, disrupting neurotransmission and compromising motor functions, which leads to paralysis and death (Gnankiné and Bassolé 2017). It should be noted that carvacrol

is a phenolic monoterpene, an isomer of thymol, present in the essential oils of several species from the Lamiaceae and Verbenaceae families (Rosado-Aguilar et al. 2017; Kachur and Suntres, 2020).

Although carvacrol has proven to be a highly efficient insecticide in the laboratory, requiring lower concentrations to cause mortality in embryos and larvae of *D. saccharalis*, thymol, its isomer, also showed significant ovicidal and larvicidal activities. Notably, in greenhouse tests, thymol surpassed carvacrol in ovicidal efficacy (98.43% vs. 89.25%), indicating greater stability under variable environmental conditions. Both compounds share the same molecular formula ($C_{10}H_{14}O$), but structural differences influence their physicochemical and biological properties. Many studies have compared the insecticidal efficiencies of these molecules. For example, Youssefi et al. (2019) concluded that carvacrol was more toxic to *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae) larvae, whereas thymol was more toxic to embryos. In a study by Dias et al. (2019a), carvacrol and thymol showed similar results for embryo and nymph mortality in *M. spectabilis*, with a slight advantage for carvacrol with eggs and thymol with nymphs. These findings, combined with the results obtained in the present study, reinforce the relevance of both compounds as promising alternatives for pest control.

It is worth mentioning that thymol is also a monoterpene found in species of the Lamiaceae and Verbenaceae families, among others, and its insecticidal activity has been reported by various authors (Somjit et al. 2015; Park et al. 2017; Tak and Isman 2017; Dias et al. 2019a; Dias et al. 2019b; Gaire et al. 2019; Lazarević et al. 2022; Nascimento et al. 2024). The mode of action of thymol in arthropods is similar to that of carvacrol, acting as a positive modulator of GABA receptors, increasing chloride ion flow, and reducing neuronal activity. This neurotoxic effect causes loss of coordination and inhibition of the muscle response, leading to the death of the insect (Jankowska et al. 2017; Price and Lummis 2022).

The comparison between the results obtained in the laboratory and greenhouse highlights the importance of considering the application environment when evaluating the efficacy of botanical compounds. Although laboratory data are fundamental for precise estimates of LC_{50} and LC_{90} , direct extrapolation to real-world conditions can overestimate effects, especially in volatile compounds or those that rapidly degrade. In this context, bioassays in greenhouses represent a strategic intermediate step as they bring the experimental model closer to practical usage conditions and allow for more realistic adjustments in formulations and application strategies.

Considering the set of results obtained in both environments, carvacrol was the most efficient compound in causing mortality in embryos and larvae of *D. saccharalis*, followed by thymol, which

demonstrated a significant and consistent effect at both stages, and 1,8-cineol, whose action was more restricted to larval control. Continued research on the use of these compounds is essential to optimize their application and assess their economic viability and environmental impact, thus contributing to the gradual replacement of synthetic insecticides and advancing more sustainable agricultural practices.

5. CONCLUSION

In this study, the insecticidal effects of three botanical compounds (carvacrol, thymol, and 1,8-cineole) on *D. saccharalis* eggs and larvae were evaluated under both laboratory and greenhouse conditions. In the laboratory, carvacrol showed the highest larval toxicity ($LC_{50} = 2.20$ mg/L) and achieved 100% ovicidal inactivation at 5.0 mg/L, followed by 1,8-cineole ($LC_{50} = 4.43$ mg/L; 47.6% ovicidal at 8.0 mg/L) and thymol ($LC_{50} = 9.60$ mg/L; 100% ovicidal at 5.0 mg/L). Thymol was the most effective in the greenhouse, with 98.43% ovicidal efficacy, followed by carvacrol (89.25%), and 1,8-cineole (60.76%). The reduction in efficacy observed outside the laboratory was related to the instability of these compounds under sunlight, variable temperature, and humidity conditions, especially in the case of 1,8-cineole. The data obtained reinforce the potential of carvacrol and thymol as alternatives for the management of *D. saccharalis*, particularly in combination with biological control strategies. Future studies should prioritize stable formulations, tests with successive sprayings, and compatibility with natural control agents to promote the effective and sustainable use of these compounds in agricultural systems.

ACKNOWLEDGMENTS

São Paulo State University (UNESP), the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), and Usina São Martinho S/A supported this research.

REFERENCES

- Abbott, W.S. 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology* 18(2):265-267.
- Abreu Reis, M., F.M.C. De Souza, I.C.D.S. Nobre, F.M.G.D.F. Dias, M.F. Grossi-de-Sá, and J.D. Antonino. 2025. Distinct biological control agents differentially modulate the immune system of the sugarcane borer larvae (*Diatraea saccharalis*). *Journal of Invertebrate Pathology* 209: e108241 <https://doi.org/10.1016/j.jip.2024.108241>
- Ahmed, N., M. Alam, M. Saeed, H. Ullah, T. Iqbal, K.A. Al-Mutairi, K. Shahjeer, R. Ullah, S. Ahmed, N.A.A.H. Ahmed, H.F. Khater, and M. Salman. 2022. Botanical Insecticides are a non-toxic alternative to conventional pesticides in the control of insects and pests. In *Global Decline of Insects*, ed. H.A.F. El-Shafie, 1-19. London: IntechOpen.

- <https://doi.org/10.5772/intechopen.100416>
- Akçay, A. The calculation of LD50 using Probit analysis. *The FASEB Journal* 27(S1):1217-1228
- Almadiy, A.A. 2020. Chemical composition, insecticidal and biochemical effects of two plant oils and their major fractions against *Aedes aegypti*, the common vector of dengue fever. *Heliyon* 6(9): e04915. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04915>
- Altaf, N., M.I.Ullah, M. Arshad, M. Afzal, L.A. Al-Shuraym, N. Mehmood, Z. Hayat, and S.M. Sayed. 2024. The chemical composition and biological activities of plant essential oils against *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Plant Diseases and Protection* 131(3): 705-717. <https://doi.org/10.1007/s41348-024-00887-0>
- Atencio, R., F.-R. Goebel, J.P. Milián, M. Rodríguez, and L. Fernández. 2017. Yield loss in sugarcane due to *Diatraea tabernella* Dyar (Lepidoptera: Crambidae) in Panama. *Sugar Tech* 19(6): 579-583. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0518-6>
- Ayilara, M.S., B.S. Adeleke, S.A. Akinola, C.A. Fayose, U.T. Adeyemi, L.A. Gbadegesin, R.K. Omole, R.M. Johnson, Q.O. Uthman, and O.O. Babalola. 2023. Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. *Frontiers in Microbiology* 14: e1040901. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1040901>
- Barton, A.F.M., B.R. Clarke, B. Dell, and A.R. Knight. 2014. Post-emergent herbicidal activity of cineole derivatives. *Journal of Pest Science* 87(3): 531-541. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0566-6>
- Beament, J.W.L. 1952. The role of cuticle and egg-shell membranes in the penetration of insecticides. *Annals of Applied Biology* 39(1): 142-143. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1952.tb01008.x>
- Bennett, R.N., and R.M. Wallsgrove. 1994. Secondary metabolites in plant defence mechanisms. *New Phytologist* 127(4): 617-633. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb02968.x>
- Beuzelin, J.M., W. Akbar, A. Mészáros, F.P.F. Reay-Jones, and T.E. Reagan. 2010. Field assessment of novaluron for sugarcane borer, *Diatraea saccharalis* (F.) (Lepidoptera: Crambidae), management in Louisiana sugarcane. *Crop Protection* 29(10): 1168-1176. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.06.004>
- Biondi, A., V. Mommaerts, G. Smagghe, E. Viñuela, L. Zappalà, and N. Desneux. 2012. The non-target impact of spinosyns on beneficial arthropods. *Pest Management Science* 68(12): 1523-1536. <https://doi.org/10.1002/ps.3396>
- Bolouri, P., R. Salami, S. Kouhi, M. Kordi, B.A. Lajayer, J. Hadian, and T. Astatkie. 2022. Applications of essential oils and plant extracts in different industries. *Molecules* 27(24): e8999. <https://doi.org/10.3390/molecules27248999>
- Bomfim, L., P. Vieira, A. Fonseca, and I. Ramos. 2017. Eggshell ultrastructure and delivery of pharmacological inhibitors to the early embryo of *R. prolixus* by ethanol permeabilization of the extraembryonic layers. *PLOS ONE* 12(9): e0185770. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185770>
- Bonmatin, J.-M., C. Giorio, F. Sánchez-Bayo, and M.B. Van Lexmond. 2021. An update of the Worldwide Integrated Assessment (WIA) on systemic insecticides. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 11709-11715. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12853-6>
- Bouwmeester, H., R.C. Schuurink, P.M. Bleeker, and F. Schiestl. 2019. The role of volatiles in plant communication. *The Plant Journal* 100(5): 892-907. <https://doi.org/10.1111/tpj.14496>
- Budeguer, F., J. Racedo, R. Enrique, M.F. Perera, S. Ostengo, and A.S. Noguera. 2024. Transgenic sugarcane for the sustainable management of the sugarcane borer *Diatraea saccharalis*. *Sugar Industry* 149: 133-138. <https://doi.org/10.36961/si30898>
- Castilhos, R.V., A.D. Grützmacher, and J.R. Coats. 2018. Acute toxicity and sublethal effects of terpenoids and essential oils on the predator *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae). *Neotropical Entomology* 47(2): 311-317. <https://doi.org/10.1007/s13744-017-0547-6>
- Chang, C.L., I.K. Cho, and Q.X. Li. 2009. Insecticidal activity of basil oil, Trans-Anethole, Estragole, and Linalool to adult fruit flies of *Ceratitis capitata*, *Bactrocera dorsalis*, and *Bactrocera cucurbitae*. *Journal of Economic Entomology* 102(1): 203-209. <https://doi.org/10.1603/029.102.0129>
- Conboy, N.J.A., T. McDaniel, D. George, A. Ormerod, M. Edwards, P. Donohoe, A.M.R. Gatehouse, and C.R. Tosh. 2020. Volatile organic compounds as insect repellents and plant elicitors: an Integrated Pest Management (IPM) strategy for glasshouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*). *Journal of Chemical Ecology* 46(11): 1090-1104. <https://doi.org/10.1007/s10886-020-01229-8>
- Cônsoli, F.L., E.W. Kitajima, and J.R.P. Parra. 1999. Ultrastructure of the natural and factitious host eggs of *Trichogramma galloi* Zucchi and *Trichogramma pretiosum* Riley (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *International Journal of Insect Morphology and Embryology* 28(3): 211-231. [https://doi.org/10.1016/S0020-7322\(99\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7322(99)00026-4)
- Danna, C., P. Malaspina, L. Cornara, A. Smeriglio, D. Trombetta, V. De Feo, and S. Vanin. 2024. *Eucalyptus* essential oils in pest control: a review of chemical composition and applications against

- insects and mites. *Crop Protection* 176: e106319. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106319>
- Daraban, G.M., R.-M. Hlihor, and D. Suteu. 2023. Pesticides vs. Biopesticides: From pest management to toxicity and impacts on the environment and human health. *Toxics* 11(12): e983. <https://doi.org/10.3390/toxics11120983>
- Daquila, B.V., F.C. Dossi, D.A. Moi, D.R. Moreira, R.R. Caleffe, J.A. Pamphile, and H. Conte. 2021. Bioactivity of *Bacillus thuringiensis* (Bacillales: Bacillaceae) on *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) eggs. *Pest Management Science* 77: 2019–2028. <https://doi.org/10.1002/ps.6230>
- De Freitas, M.D.R.T., E.L. Da Silva, A.D.L. Mendonça, C.E. Da Silva, A.P.P. Da Fonseca, J.D.S. Santos, R.R. Do Nascimento, and A.E.G. Sant'ana. 2007. The biology of *Diatraea flavipennella* (Lepidoptera: Crambidae) reared under laboratory conditions. *Florida Entomologist* 90(2): 309–313. [https://doi.org/10.1653/0015-4040\(2007\)90\[309:TBODFL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1653/0015-4040(2007)90[309:TBODFL]2.0.CO;2)
- De Oliveira, W.S., C.I.R. Sakuno, L.L. Miraldo, M.A.G.C. Tavares, K.M.A. Komada, D. Teresani, J.L.X. Santos, and F. Huang. 2022. Varied frequencies of resistance alleles to *CRY1AB* and *CRY1AC* among Brazilian populations of the sugarcane borer, *Diatraea saccharalis* (F.). *Pest Management Science* 78(12): 5150–5163. <https://doi.org/10.1002/ps.7133>
- Dhakad, A.K., V.V. Pandey, S. Beg, J.M. Rawat, and A. Singh. 2018. Biological, medicinal and toxicological significance of *Eucalyptus* leaf essential oil: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 98(3): 833–848. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8600>
- Dias, M.L., A.M. Auad, M.C. Magno, T.T. Resende, M.G. Fonseca, and S.E.B. Silva. 2019a. Insecticidal activity of compounds of plant origin on *Mahanarva spectabilis* (Hemiptera: Cercopidae). *Insects* 10(10): e360. <https://doi.org/10.3390/insects10100360>
- Dias, M.L., A.M. Auad, and T.T. De Resende. 2019b. Insecticidal effects of thymol on *Mahanarva spectabilis* (Hemiptera: Cercopidae) in two evaluation methodologies. *Journal of Agricultural and Crop Research* 7(10): 181–185. https://doi.org/10.33495/jacr_v7i10.19.154
- Divekar, P.A., S. Narayana, B.A. Divekar, R. Kumar, B.G. Gadratagi, A. Ray, A.K. Singh, V. Rani, V. Singh, A.K. Singh, A. Kumar, R.P. Singh, R.S. Meena, and T.K. Behera. 2022. Plant secondary metabolites as defense tools against herbivores for sustainable crop protection. *International Journal of Molecular Sciences* 23(5): e2690. <https://doi.org/10.3390/ijms23052690>
- Ebadollahi, A., B. Naseri, Z. Abedi, and W.N. Setzer. 2022. Chemical profiles and insecticidal potential of essential oils isolated from four *Thymus* species against *Rhyzopertha dominica* (F.). *Plants* 11(12): e1567. <https://doi.org/10.3390/plants11121567>
- Farag, S.M., M.A.M. Moustafa, A. Fónagy, O.M.H.M. Kamel, and D.R. Abdel-Haleem. 2024. Chemical composition of four essential oils and their adulticidal, repellence, and field oviposition deterrence activities against *Culex pipiens* L. (Diptera: Culicidae). *Parasitology Research* 123(1): e110. <https://doi.org/10.1007/s00436-024-08118-z>
- Fernandes Souza, C.D.S., B.H.S. De Souza, C.B. De Menezes, M.L.F. Simeone, P.T. Nascimento, J.C.O. França, and S.M. Mendes. 2023. Multiple resistance to primary pests of grain sorghum hybrids: *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae), and *Diceraeus melacanthus* (Hemiptera: Pentatomidae). *Revista Brasileira de Entomologia* 67(1): e20210118. <https://doi.org/10.1590/1806-9665-rbent-2021-0118>
- Fogliata, S.V., M.F. Perera, A. Alves-Pereira, M.I. Zucchi, and M.G. Murúa. 2022. Unraveling the population structure of the sugarcane borer, *Diatraea saccharalis*, in Argentina. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 170(6): 530–545. <https://doi.org/10.1111/eea.13174>
- Francischini, F.J.B., J.B. De Campos, A. Alves-Pereira, J.P.G. Viana, C.C. Grinter, S.J. Clough, and M.I. Zucchi. 2017. Morphological and molecular characterization of Brazilian populations of *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) and the evolutionary relationship among species of *Diatraea* Guilding. *PLOS ONE* 12(11): e018626. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186266>
- Francischini, F.J.B., E.M.G. Cordeiro, J.B. De Campos, A. Alves-Pereira, J.P.G. Viana, X. Wu, W. Wei, P. Brown, A. Joyce, G. Murua, S. Fogliata, S.J. Clough, M. I. Zucchi. 2019. *Diatraea saccharalis* history of colonization in the Americas. The case for human-mediated dispersal. *PLOS ONE* 14(7): e0220031. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220031>
- Gaire, S., M.E. Scharf, and A.D. Gondhalekar. 2019. Toxicity and neurophysiological impacts of plant essential oil components on bed bugs (Cimicidae: Hemiptera). *Scientific Reports* 9(1): e3961. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40275-5>
- Gallán, D.Z., A.B. Penteriche, M.O. Henrique, and M.C. Silva-Filho. 2023. Sugarcane multitrophic interactions: Integrating belowground and aboveground organisms. *Genetics and Molecular Biology* 46(1 Suppl 1): e20220163. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-gmb-2022-0163>
- García Degano, F., M.L.D.P. Pérez, L. Dami, A. Salvatore, M.I. Herrero, A. Nikpay, S. Ostengo, and G.

- Gastaminza. 2024. Susceptibility of *Diatraea saccharalis* Populations (Lepidoptera: Crambidae) to *Bt* toxins expressed in genetically modified corns for development of transgenic sugarcane in Argentina. *Sugar Tech* 26(3): 776-785. <https://doi.org/10.1007/s12355-024-01392-2>
- Gautam, S.G., G.P. Opit, D. Margosan, J.S. Tebbets, and S. Walse. 2014. Egg morphology of key stored-product insect pests of the United States. *Annals of the Entomological Society of America* 107(1): 1-10. <https://doi.org/10.1603/AN13103>
- Gnankiné, O., and I. Bassolé. 2017. Essential oils as an alternative to pyrethroids' resistance against *Anopheles* species complex giles (Diptera: Culicidae). *Molecules* 22(10): e1321. <https://doi.org/10.3390/molecules22101321>
- Gong, X., and Y. Ren. 2020. Larvicidal and ovicidal activity of carvacrol, p-cymene, and γ -terpinene from *Origanum vulgare* essential oil against the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Environmental Science and Pollution Research* 27(15): 18708-18716. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08391-2>
- Hacı-Wydro, K., M. Flasiński, M. Broniatowski, and M. Sołtys. 2017. Studies on the behavior of Eucalyptol and Terpinen-4-ol - natural food additives and ecological pesticides - in model lipid membranes. *Langmuir* 33(27), 6916-6924. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b00774>
- Hensley, S.D., and A.M. Hammond. 1968. Laboratory techniques for rearing the Sugarcane Borer on an artificial diet. *Journal of Economic Entomology* 61(6): 1742-1743. <https://doi.org/10.1093/jee/61.6.1742>
- Hernández-García, V., R. Osorio-Osorio, L.U. Hernández-Hernández, C. Márquez-Quiróz, E.D.L. Cruz-Lázaro, and L.A. Aguirre-Urbe. 2015. Damage by *Diatraea saccharalis* (Fabricius) to Sugarcane at la Chontalpa, Tabasco, México. *Southwestern Entomologist* 40(3): 493-496. <https://doi.org/10.3958/059.040.0306>
- Hernández-Velázquez, V.M., L.P. Lina-García, V. Obregón-Barboza, A.G. Trejo-Loyo, and G. Peña-Chora. 2012. Pathogens associated with Sugarcane Borers, *Diatraea* spp. (Lepidoptera: Crambidae): A review. *International Journal of Zoology* 2012: e303589. <https://doi.org/10.1155/2012/303589>
- Hua, L.-T., R.-L. Wu, C.-L. Li, C.-N. Wang, Y.-L. Li, and F.-L. Xu. 2024. Experimental study on photodegradation and leaching of typical pesticides in greenhouse soil from Shouguang, Shandong Province, East China. *Ecological Processes* 13(1): e23. <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00503-x>
- Iqbal, T., N. Ahmed, K. Shahjeer, S. Ahmed, K.A. Al-Mutairi, H.F. Khater, and R.F. Ali. 2021. Botanical insecticides and their potential as anti-insect/pests: Are they successful against insects and pests? In *Global Decline of Insects*, ed. H.A.F. El-Shafie, 1-14. London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100418>
- Isman, M.B. 2015. A renaissance for botanical insecticides? *Pest Management Science* 71(12): 1587-1590. <https://doi.org/10.1002/ps.4088>
- Jankowska, M., J. Rogalska, J. Wyszowska, and M. Stankiewicz. 2017. Molecular targets for components of essential oils in the insect nervous system—A review. *Molecules* 23(1): e34. <https://doi.org/10.3390/molecules23010034>
- Jyotsna, B., S. Patil, Y.S. Prakash, P. Rathnagiri, P.B. Kavi Kishor, and N. Jalaja. 2024. Essential oils from plant resources as potent insecticides and repellents: Current status and future perspectives. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 61: e103395. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103395>
- Kachur, K., and Z. Suntres. 2020. The antibacterial properties of phenolic isomers, carvacrol and thymol. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 60(18): 3042-3053. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1675585>
- Karabörklü, S., and A. Ayvaz. 2023. A comprehensive review of effective essential oil components in stored-product pest management. *Journal of Plant Diseases and Protection* 130(3): 449-481. <https://doi.org/10.1007/s41348-023-00712-0>
- Kheloul, L., S. Anton, D. Bréard, and A. Kellouche. 2021. Fumigant toxicity of some essential oils and eucalyptol on different life stages of *Tribolium confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Botany Letters* 170(1): 3-14. <https://doi.org/10.1080/23818107.2021.1982767>
- Koma Okwute, S. 2012. Plants as potential sources of pesticidal agents: A review. In *Pesticides - Advances in Chemical and Botanical Pesticides*, ed. R. P. Soundararajan, 207-320. London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/46225>
- Kopparthi, A.V.S. 2020. Compatibility of biopesticides with insecticides in ipm. *Indian Journal of Entomology* 82: 588. <https://doi.org/10.5958/0974-8172.2020.00146.7>
- Kumrungsee, N., W. Pluempanupat, O. Koul, and V. Bullangpoti. 2014. Toxicity of essential oil compounds against diamondback moth, *Plutella xylostella*, and their impact on detoxification

- enzyme activities. *Journal of Pest Science* 87(4): 721-729. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0602-6>
- Laranjeira Rôdas, P., H.N. de Oliveira, and D.F. Glaeser. 2019. Liberação do parasitoide *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) em *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) na cana-de-açúcar. *Interciencia* 44: 287–290.
- Lazarević, J., S. Jevremović, I. Kostić, A. Vuleta, S.M. Jovanović, M. Kostić, and D.Š. Jovanović. 2022. Assessment of sex-specific toxicity and physiological responses to thymol in a common bean pest *Acanthoscelides obtectus* Say. *Frontiers in Physiology* 13: e842314. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.842314>
- Li, A.-M., Z.-L. Chen, F. Liao, Y. Zhao, C.-X. Qin, M. Wang, Y.-Q. Pan, S.-L. Wei, and D.-L. Huang. 2024. Sugarcane borers: species, distribution, damage and management options. *Journal of Pest Science* 97(3): 1171-1201. <https://doi.org/10.1007/s10340-024-01750-9>
- Lichiheb, N., E. Personne, C. Bedos, F. Van Den Berg, and E. Barriuso. 2016. Implementation of the effects of physicochemical properties on the foliar penetration of pesticides and its potential for estimating pesticide volatilization from plants. *Science of The Total Environment* 550: 1022-1031. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.058>
- Lima, A.P.S., Emile D.R. Santana, A.C.C. Santos, J.E.S., G.T. Ribeiro, A.M. Pinheiro, Í.T.B.F. Santos, A.F. Blank, A.P.A. Araújo, and L. Bacci. 2020. Insecticide activity of botanical compounds against *Spodoptera frugiperda* and selectivity to the predatory bug *Podisus nigrispinus*. *Crop Protection* 136: e105230. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105230>
- Liu, J., Y. Lin, Y. Huang, L. Liu, X. Cai, J. Lin, and B. Shu. 2023. The effects of carvacrol on development and gene expression profiles in *Spodoptera frugiperda*. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 195: 105539. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105539>
- Lo Pinto, M., L. Vella, and A. Agrò. 2022. Oviposition deterrence and repellent activities of selected essential oils against *Tuta absoluta* Meyrick (Lepidoptera: Gelechiidae): laboratory and greenhouse investigations. *International Journal of Tropical Insect Science* 42(5): 3455-3464. <https://doi.org/10.1007/s42690-022-00867-7>
- Locatelli D.P., M. Stampini, and D. Bonvini. 2006. Insecticidal activity of 1.8-cineole against *Plodia interpunctella* (Hbn.) (Lepidoptera Pyralidae). *Bollettino di zoologia agraria e di bachicoltura* 38(2): 179-186.
- Luna-Cruz, A., J.R. Lomeli-Flores, E. Rodríguez-Leyva, H. Tovar-Hernández, J.M. Vanegas-Rico, and J.E. Murillo-Hernández. 2018. Toxicidad de un insecticida botánico sobre *Bombus impatiens*, *Apis mellifera*, *Chrysoperla carnea* y *Orius insidiosus*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9(7): 1423-1433. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.851>
- Lyons, S.M., and K.J. Hageman. 2021. Foliar photodegradation in pesticide fate modeling: Development and Evaluation of the Pesticide Dissipation from Agricultural Land (PeDAL) model. *Environmental Science & Technology* 55(8): 4842-4850. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07722>
- Macedo, I.T.F., C.M.L. Bevilaqua, L.M.B. De Oliveira, A.L.F. Camurça-Vasconcelos, L.D.S. Vieira, F.R. Oliveira, E.M. Queiroz-Junior, B.G. Portela, R.S. Barros, and A.C.S. Chagas. 2009. Ovicidal and larvicidal activity in vitro of *Eucalyptus globulus* essential oils on *Haemonchus contortus*. *Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária* 18(3): 62-66. <https://doi.org/10.4322/rbpv.01803011>
- Macedo, N., J.R. de Araújo, and P.S.M. Botelho. 1993. Sixteen years of biological control of *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Pyralidae) by *Cotesia flavipes* (Cam.) (Hymenoptera: Braconidae), in the State of São Paulo, Brazil. *Anais da Sociedade Entomologica Brasileira* 22: 441–448.
- Maciel, M.V., S.M. Morais, C.M.L. Bevilaqua, R.A. Silva, R.S. Barros, R.N. Sousa, L.C. Sousa, E.S. Brito, and M.A. Souza-Neto. 2010. Chemical composition of *Eucalyptus* spp. essential oils and their insecticidal effects on *Lutzomyia longipalpis*. *Veterinary Parasitology* 167(1): 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2009.09.053>
- Mączka, W., A. Duda-Madej, A. Górny, M. Grabarczyk, and K. Wińska. 2021. Can eucalyptol replace antibiotics? *Molecules* 26(16): e4933. <https://doi.org/10.3390/molecules26164933>
- Nascimento, G.J., L.H.G. Oliveira, H.L. Rique, R.T. Leite, and F.C. Nunes. 2024. Repellence and insecticidal activity mediated by necrosis in *Aedes aegypti* mosquitoes exposed to thymol. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia* 76(1): 77-83. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-13027>
- Oguh, C.E., C.O. Okpaka, C.S. Ubani, U. Okekeaji, P.J. Shaba, and E. Amadi. 2019. Natural pesticides (biopesticides) and uses in pest management—a critical review. *Asian Journal of Biotechnology and Genetic Engineering* 2(3): 1-18.
- Omara, T., F.K. Kateeba, B. Musau, E. Kigenyi, E. Adupa, and S. Kagoya. 2018. Bioinsecticidal activity of eucalyptol and 1R-Alpha-Pinene rich acetonic oils of *Eucalyptus saligna* on *Sitophilus zeamais*

- Motschulsky, 1855 (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Health and Environmental Research* 4(4): 153-160. <https://doi.org/10.11648/j.jher.20180404.15>
- Ouabou, M., H. Annaz, F. Maggi, M. Ferrati, E. Spinozzi, and A. El Amrani. 2024. Insecticidal, antifeedant, and repellent effect of *Lavandula mairei* var. *antiatlantica* essential oil and its major component carvacrol against *Sitophilus oryzae*. *Journal of Stored Products Research* 107: e102338. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102338>
- Park, J.-H., Y.-J. Jeon, C.-H. Lee, N. Chung, and H.-S. Lee. 2017. Insecticidal toxicities of carvacrol and thymol derived from *Thymus vulgaris* Lin. against *Pochazia shantungensis* Chou & Lu., newly recorded pest. *Scientific Reports* 7(1): e40902. <https://doi.org/10.1038/srep40902>
- Pavela, R., and G. Benelli. 2016. Essential oils as ecofriendly biopesticides? Challenges and constraints. *Trends in Plant Science* 21(12): 1000-1007. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.10.005>
- Pavela, R., and M. Novák. 2024. Insecticidal activity of some major essential oil components against *Metopolophium dirhodum* and Its Predators. *Plants* 13(13): 1863. <https://doi.org/10.3390/plants13131863>
- Pickett, J.A., and Z.R. Khan. 2016. Plant volatile-mediated signalling and its application in agriculture: successes and challenges. *New Phytologist* 212(4): 856-870. <https://doi.org/10.1111/nph.14274>
- Pimentel, G.V., A.C. Tomaz, B.P. Brasileiro, L.A. Peternelli, and M.H.P. Barbosa. 2017. Oviposition preference and larval performance of sugarcane borer in eight sugarcane genotypes. *Ciência e Agrotecnologia* 41(4): 439-446. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017414004317>
- Prabhaker, N., S.J. Castle, S.E. Naranjo, N.C. Toscano, and J.G. Morse. 2011. Compatibility of two systemic neonicotinoids, imidacloprid and thiamethoxam, with various natural enemies of agricultural pests. *Journal of Economic Entomology* 104(3): 773-781. <https://doi.org/10.1603/EC10362>
- Price, K.L., and S.C.R. Lummis. 2022. Characterisation of thymol effects on RDL receptors from the bee parasite *Varroa destructor*. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 183: e105064. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105064>
- Qasim, M., W. Islam, M. Rizwan, D. Hussain, A. Noman, K. Ali Khan, H.A. Ghramh, and X. Han. 2024. Impact of plant monoterpenes on insect pest management and insect-associated microbes. *Heliyon* 10(20): e39120. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39120>
- Qian, Q., J. Cui, Y. Miao, X. Xu, H. Gao, H. Xu, Z. Lu, and P. Zhu. 2024. The plant volatile-sensing mechanism of insects and its utilization. *Plants* 13(2): e185. <https://doi.org/10.3390/plants13020185>
- Rattan, R.S. 2010. Mechanism of action of insecticidal secondary metabolites of plant origin. *Crop Protection* 29(9): 913-920. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.05.008>
- Reddy, D.S., and N.M. Chowdary. 2021. Botanical biopesticide combination concept—a viable option for pest management in organic farming. *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 31: e23. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00366-w>
- Regnault-Roger, C., C. Vincent, and J.T. Arnason. 2012. Essential oils in insect control: Low-Risk products in a high-stakes world. *Annual Review of Entomology* 57(1): 405-424. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120710-100554>
- Reis, D.L.R.S., A.B. Carneiro, V.D. Cruz, E.H.M. Fernandes, C.M. Knoechelmann, and F.F.S. Siqueira. 2023. Potencial de plantas inseticidas no controle de formigas cortadeiras no Brasil. *UNISANTA Bioscience* 12: 17-39.
- Ribeiro, L.D.P., A.C.S. Biermann, M.P. Dorneles, and J.D. Vendramim. 2016. Ação de inseticidas botânicos sobre o curuquerê-da-couve. *Agropecuária Catarinense* 29(2): 84-89. <https://doi.org/10.52945/rac.v29i2.74>
- Rocha, R.D.A., P.V. Dos Santos, J.D.B. Pazini, A.C.D.S. Almeida, and A.R. Da Silva. 2024. Rice responses to the stem borer *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) by infrared-thermal imaging: Implications for field management. *Stresses* 4(4): 744-751. <https://doi.org/10.3390/stresses4040048>
- Rosado-Aguilar, J.A., K. Arjona-Cambranes, J.F.J. Torres-Acosta, R.I. Rodríguez-Vivas, M.E. Bolio-González, A. Ortega-Pacheco, A. Alzina-López, E.J. Gutiérrez-Ruiz, E. Gutiérrez-Blanco, and A.J. Aguilar-Caballero. 2017. Plant products and secondary metabolites with acaricide activity against ticks. *Veterinary Parasitology* 238: 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2017.03.023>
- Rossato, J.A.D.S., G.H.G. Costa, L.L. Madaleno, M.J.R. Mutton, L.G. Higley, and O.A. Fernandes. 2013. Characterization and impact of the sugarcane borer on sugarcane yield and quality. *Agronomy Journal* 105(3): 643-648. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0309>
- Sain, S.K., D. Monga, S. Kranthi, N.S. Hiremani, D.T. Nagrale, R. Kumar, S.K. Verma, and Y.G. Prasad. 2022. Evaluation of the bioefficacy and insecticide compatibility of entomopathogens for management of Whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae) on upland cotton under laboratory and

- polyhouse conditions. *Neotropical Entomology* 51(4): 600-612. <https://doi.org/10.1007/s13744-022-00964-9>
- Salvatore, A., M.B. García, E. Romero, and E. Willink. 2010. Sugar losses caused by the sugarcane borer (*Diatraea saccharalis*) in Tucumán, Argentina. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, 27: 1-10.
- Sánchez-Bayo, F., and H.A. Tennekes. 2020. Time-cumulative toxicity of neonicotinoids: Experimental evidence and implications for environmental risk assessments. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(5): e1629. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051629>
- Santos, A.L.Z., C.P.G. Pinto, S.S. Fonseca, E.B. De Azevedo, R.A. Polanczyk, and G.D. Rossi. 2022. Immune interactions, risk assessment and compatibility of the endoparasitoid *Cotesia flavipes* parasitizing *Diatraea saccharalis* larvae exposed to two entomopathogenic fungi. *Biological Control* 166: e104836. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104836>
- Sarma, R., K. Adhikari, S. Mahanta, and B. Khanikar. 2019. Combinations of plant essential oil-based terpene compounds as larvicidal and adulticidal agent against *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Scientific Reports* 9(1): e9471. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45908-3>
- Seol, G.H., and K.Y. Kim. 2016. Eucalyptol and its role in chronic diseases. In *Drug Discovery from Mother Nature*, ed. S.C. Gupta, S. Prasad, and B.B. Aggarwal, 389–398. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41342-6_18
- Sfara, V., E.N. Zerba, and R.A. Alzogaray. 2009. Fumigant insecticidal activity and repellent effect of five essential oils and seven monoterpenes on first-instar nymphs of *Rhodnius prolixus*. *Journal of Medical Entomology* 46(3): 511-515. <https://doi.org/10.1603/033.046.0315>
- Silva, M.F.D., M. Funichello, and D.M. De Souza. 2020. Performance of insecticides in control of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) in sugarcane. *Arquivos do Instituto Biológico* 87: e0782018. <https://doi.org/10.1590/1808-1657000782018>
- Solis, M.A., and M. Metz. 2016. An illustrated guide to the identification of the known species of *Diatraea* Guilding (Lepidoptera, Crambidae, Crambinae) based on genitalia. *ZooKeys* 565: 73–121. <https://doi.org/10.3897/zookeys.565.6797>
- Somjit, C., N. Kumrungsee, W. Pluempanupat, and V. Bullanpotil. 2015. Insecticidal activities of thymol on egg production and development in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera). *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences* 80: 187–192.
- Souto, A.L., M. Sylvestre, E.D. Tölke, J.F. Tavares, J.M. Barbosa-Filho, and G. Cebrián-Torrejón. 2021. Plant-derived pesticides as an alternative to pest management and sustainable agricultural production: prospects, applications and challenges. *Molecules* 26(16): e4835. <https://doi.org/10.3390/molecules26164835>
- Sparks, T.C., F.J. Wessels, B.A. Lorschach, B.M. Nugent, and G.B. Watson. 2019. The new age of insecticide discovery-the crop protection industry and the impact of natural products. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 161: 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.09.002>
- Spletozer, A.G., C.R. Dos Santos, L.A. Sanches, and J. Garlet. 2021. Plants with insecticide potential: focus on Amazon species. *Ciência Florestal* 31(2): 974-997. <https://doi.org/10.5902/1980509832244>
- Tabari, M.A., M.R. Youssefi, F. Maggi, and G. Benelli. 2017. Toxic and repellent activity of selected monoterpenoids (thymol, carvacrol and linalool) against the castor bean tick, *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae). *Veterinary Parasitology* 245: 86-91. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2017.08.012>
- Tak, J.-H., and M.B. Isman. 2017. Enhanced cuticular penetration as the mechanism of synergy for the major constituents of thyme essential oil in the cabbage looper, *Trichoplusia ni*. *Industrial Crops and Products* 101: 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.003>
- Tamiru, A., and Z. Khan. 2017. Volatile semiochemical mediated plant defense in cereals: A novel strategy for crop protection. *Agronomy* 7(3): e58. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030058>
- Tlak Gajger, I., and S.A. Dar. 2021. Plant Allelochemicals as Sources of Insecticides. *Insects* 12: 189. <https://doi.org/10.3390/insects12030189>
- Tomaz, A.C., A.E. Coutinho, B.O. Soares, L.A. Peternelli, E.J.G. Pereira, and M.H.P. Barbosa. 2018. Assessing resistance of sugarcane varieties to sugarcane borer *Diatraea saccharalis* Fab. (Lepidoptera: Crambidae). *Bulletin of Entomological Research* 108(4): 547-555. <https://doi.org/10.1017/S0007485317001183>
- Tomizawa, M., and J.E. Casida. 2005. Neonicotinoid insecticide toxicology: Mechanisms of selective action. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* 45(1): 247-268. <https://doi.org/10.1146/annurev.pharmtox.45.120403.095930>
- Usha, J., M. Nareem Babu, and V. Padmaja. 2014. Detection of compatibility of entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. with pesticides, fungicides and botanicals. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences* 4: 613–624.
- Vacari, A.M., G.D.S. Genovez, V.L. De Laurentis, and S.A. De Bortoli. 2012. Fonte proteica na criação de

- Diatraea saccharalis* e seu reflexo na produção e no controle de qualidade de *Cotesia flavipes*. *Bragantia* 71(3): 355-361. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052012005000033>
- Wandjou, J.G. Nkuimi, C.B., M. Ferrati, F. Maggi, R. Pavela, N. Tsabang, R. Petrelli, R. Ricciardi, N. Desneux, and G. Benelli. 2022. Essential oils from cameroonian aromatic plants as effective insecticides against mosquitoes, houseflies, and moths. *Plants* 11(18): e2353. <https://doi.org/10.3390/plants11182353>
- Wilson, B.E., W.H. White, R.T. Richard, and R.M. Johnson. 2020. Population trends of the sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae) in Louisiana sugarcane. *Environmental Entomology* 49(6): 1455-1461. <https://doi.org/10.1093/ee/nvaa127>
- Wilson, B.E. 2021. Successful integrated pest management minimizes the economic impact of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) on the Louisiana Sugarcane Industry. *Journal of Economic Entomology* 114(1): 468-471. <https://doi.org/10.1093/jee/toaa246>
- Wilson, B.E., L.D. Salgado, and J.M. Villegas. 2022. Optimizing chemical control for *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) in sugarcane. *Crop Protection* 152: e105843. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105843>
- Yang, X., and B. Song. 2024. Utilization of natural plant volatiles for pest control in maize. *Molecular Entomology* 15(2): 61-68. <https://doi.org/10.5376/me.2024.15.0008>
- Youssefi, M.R., M.A. Tabari, A. Esfandiari, S. Kazemi, A.A. Moghadamnia, S. Sut, S. Dall'Acqua, G. Benelli, and F. Maggi. 2019. Efficacy of two monoterpenoids, carvacrol and thymol, and their combinations against eggs and larvae of the west nile vector *Culex pipiens*. *Molecules* 24(10): e1867. <https://doi.org/10.3390/molecules24101867>

Tables and Figures



Figure 1. Experimental setup for assessing ovicidal activity under greenhouse conditions. The egg masses of *Diatraea saccharalis* were fixed to sugarcane leaves using small paper squares and metal staples. Each egg mass was enclosed in a protective voile bag secured with tape to prevent desiccation and predation. Plants were grown individually in 5 L pots with substrate under natural light and temperature conditions. Part of the schematic representation was generated with the assistance of an artificial intelligence tool (ChatGPT, OpenAI).

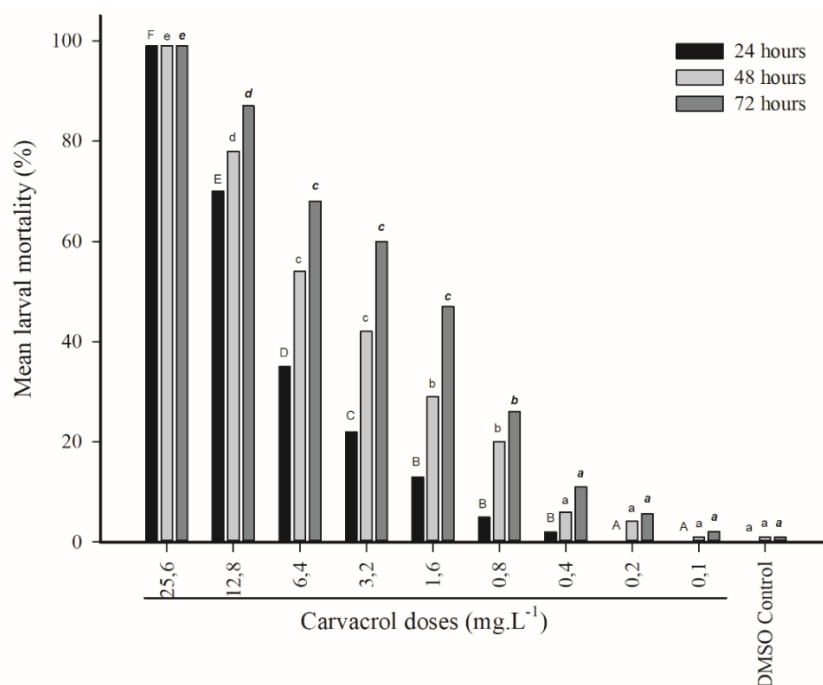


Figure 2. Insecticidal activity of different concentrations of carvacrol on second-instar larvae of *Diatraea saccharalis* after 24, 48, and 72 h of application. Different letters represent significant differences between treatments at 24 h (uppercase letters), 48 h (lowercase letters), and 72 h (bold lowercase letters) according to the Scott-Knott test ($p < 0.05$).

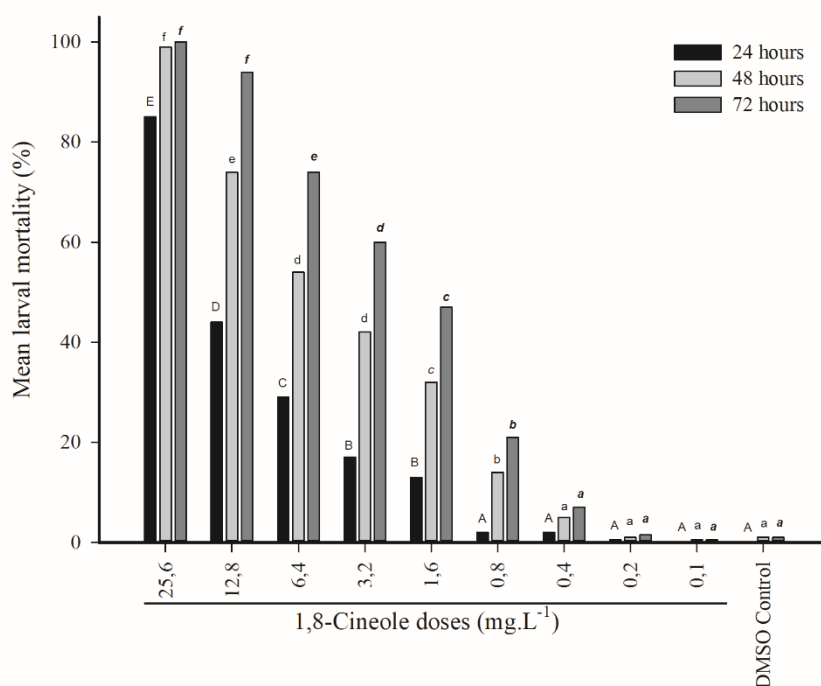


Figure 3. Insecticidal activity of different concentrations of 1,8-cineole on second instar larvae of *Diatraea saccharalis* after 24, 48, and 72 h of application. Different letters represent significant differences between treatments at 24 h (uppercase letters), 48 h (lowercase letters), and 72 h (bold lowercase letters) according to the Scott Knott test ($p < 0.05$).

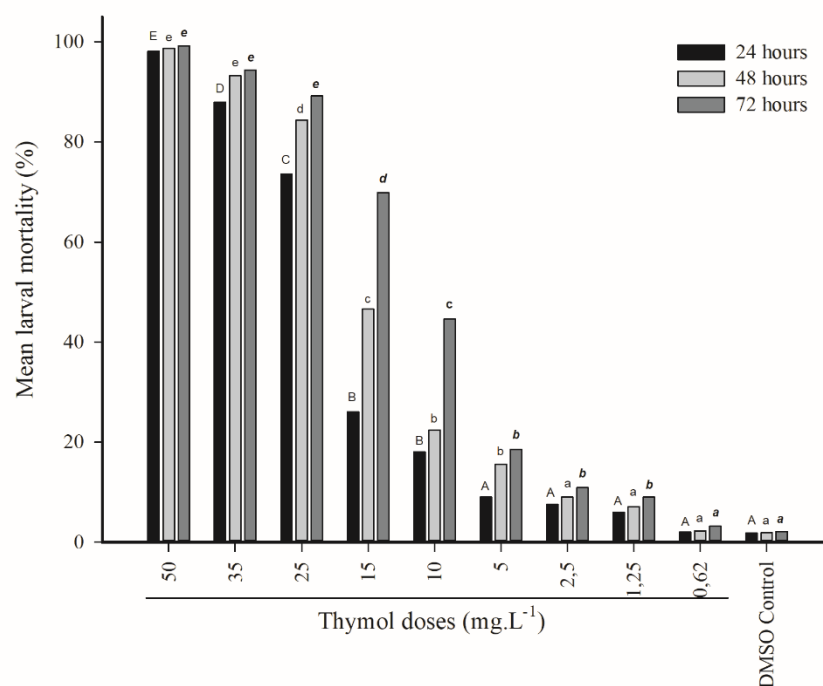


Figure 4. Insecticidal activity of different concentrations of thymol on second-instar larvae of *Diatraea saccharalis* after 24, 48, and 72 h of application. Different letters indicate significant differences between treatments at 24 h (uppercase letters), 48 h (lowercase letters), and 72 h (bold lowercase letters) according to the Scott-Knott test ($p < 0.05$).

Table 1: Result of the Probit Analysis showing the toxicity of Carvacrol, 1,8-cineole, and Thymol for 2nd instar larvae of *Diatraea saccharalis*

Botanical Compound	n	LC ₅₀ (mg·L ⁻¹) (95% CI)	Slope ± SE	χ ² (df)	p-value
Carvacrol	700	2.20 (1.87–2.58)	1.55 ± 0.10	8.93 (5)	0.1117
1,8-Cineole	600	4.43 (3.82–5.14)	1.81 ± 0.13	5.45 (4)	0.2437
Thymol	700	9.60 (7.80–11.58)	2.70 ± 0.23	10.20 (5)	0.0698

LC₅₀ = median lethal concentration; CI = confidence interval; SE = standard error; χ² = chi-square goodness of fit.

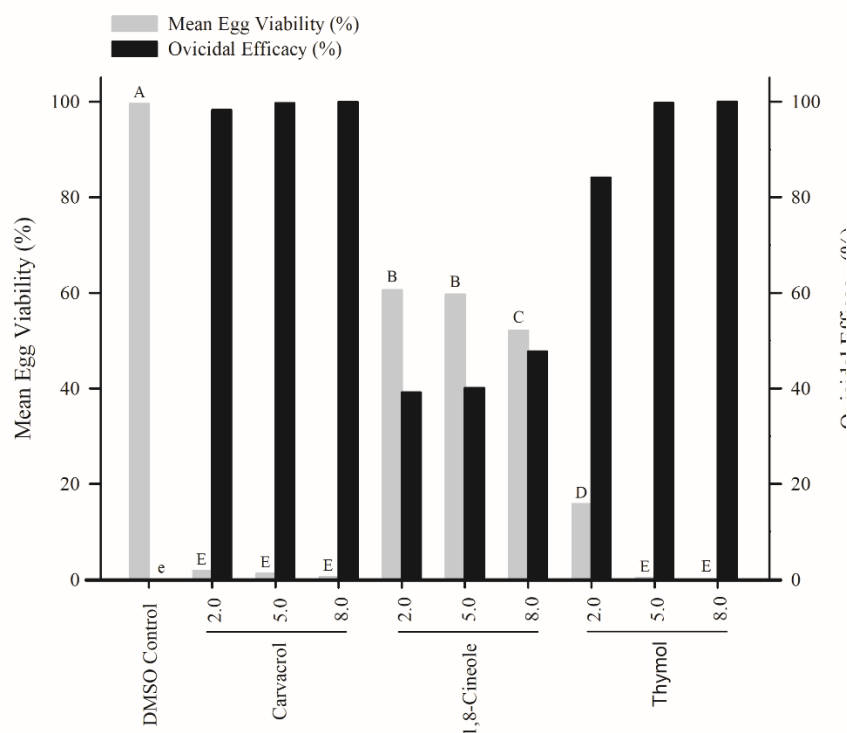


Figure 5. Ovicidal activity of plant-derived compounds (at concentrations of 2, 5, and 8 mg/L) and DMSO control against *Diatraea saccharalis* after 72 hours of exposure. Treatment efficacy was calculated using Abbott's formula. Different letters indicate significant differences between treatments for mean viability (uppercase letters) and ovicidal effect (lowercase letters) according to the Scott-Knott test ($p < 0.05$).

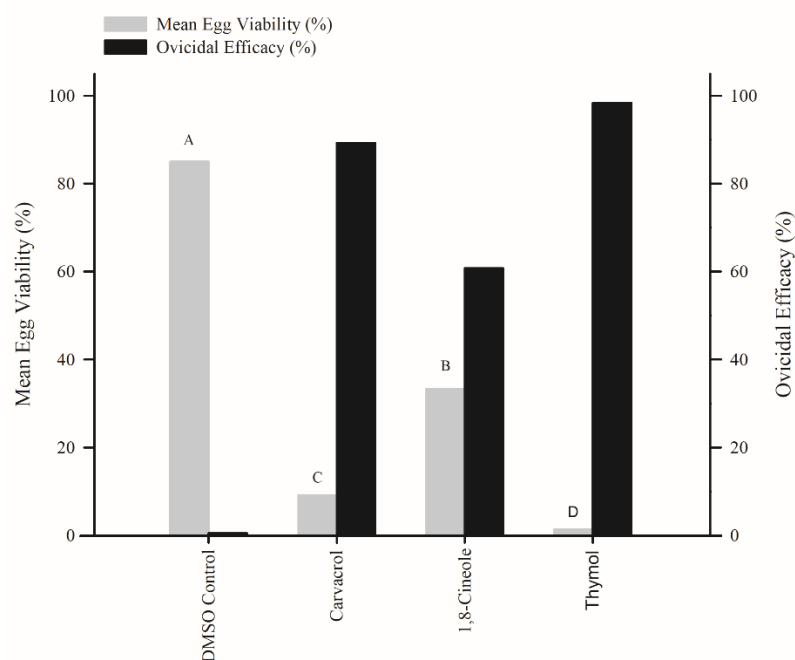


Figure 6. Ovicidal activity of plant-derived compounds (2, 5, and 8 mg/L) and DMSO control against *Diatraea saccharalis* after 72 hours of exposure in greenhouse conditions. Control efficiency was calculated using Abbott's formula. Different letters indicate significant

differences among treatments for mean egg viability (uppercase letters) and ovicidal effect (lowercase letters) according to Scott-Knot.

CAPÍTULO 3: Efeitos subletais de três inseticidas de origem botânica no desenvolvimento e reprodução de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae)

RESUMO - A broca-da-cana *Diatraea saccharalis* é uma praga-chave da cana-de-açúcar no Brasil, e uma das táticas de controle mais utilizadas é a química. Inseticidas de origem botânica se configuram como uma alternativa ao controle químico com moléculas sintéticas, contudo, sua alta volatilidade favorece exposições de campo em subdoses, tornando relevante avaliar efeitos subletais. Testamos, em CL_{30} , três monoterpenos (1,8-cineol, carvacrol e timol) aplicados em larvas de 2º instar e acompanhamos a geração F_0 . O desenvolvimento (período larval e pupal) e a longevidade mantiveram-se semelhantes ao controle em todos os tratamentos, mas houve impactos na sobrevivência e reprodução. A pupação foi reduzida por carvacrol e 1,8-cineol, a eclosão caiu em todos os tratamentos e a fecundidade diminuiu apenas com carvacrol. A análise demográfica confirmou o padrão: carvacrol promoveu a maior supressão populacional (queda de R_0 e r_m , aumento de D_t), 1,8-cineol apresentou efeito intermediário, e timol permaneceu próximo ao controle. Concluimos que, mesmo sem alterar a cronologia do ciclo, monoterpenos podem desacelerar o crescimento populacional de *D. saccharalis* ao afetar pupação, eclosão e fecundidade, com destaque para o carvacrol. Esses resultados respaldam o uso desses compostos em MIP e sugerem que melhorias na formulação podem potencializar sua eficácia em condições de campo.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, broca-da-cana, MIP, timol, carvacrol, 1,8-cineol.

1. Introdução

A broca-da-cana, *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae), é a principal praga da cana-de-açúcar no Brasil, ocorrendo em todas as regiões produtoras (Silva-Brandao et al., 2015; Francischini et al., 2017; Lopes et al., 2022). As lagartas iniciam a alimentação no limbo foliar e, a partir do 2º instar, perfuram e constroem galerias nos colmos da cana-de-açúcar, o que compromete o crescimento da planta e o fluxo de nutrientes (Alves et al., 2024). Estima-se que cada 1% de infestação pode reduzir em cerca de 0,25% a produção de açúcar e 0,20% a de etanol, com perdas da ordem de 620–650 g de açúcar por tonelada de cana, a depender da variedade (Salvatore et al., 2010; Francischini et al., 2017). Além disso, há queda de 5,6–5,8% na pureza do caldo, diminuindo a sacarose recuperável (Salvatore et al., 2010), o que reforça a necessidade de estratégias de controle eficazes para mitigar esses impactos.

Uma das estratégias de manejo da broca-da-cana é aplicar inseticidas sobre as larvas de *D. saccharalis* em instares iniciais, antes de entrarem nos colmos, com cobertura dirigida ao cartucho e às folhas-bainha (Wilson et al., 2022). No entanto, em condições de campo a aplicação raramente é uniforme devido à arquitetura da planta, à declividade do terreno, à tecnologia de aplicação disponível e à qualificação da equipe (Foqué e Nuytens, 2011). Essa heterogeneidade pode reduzir a deposição e, por consequência, a concentração do ingrediente ativo nas folhas, resultando em doses abaixo do necessário e favorecendo respostas subletais (Forster e Kimberley, 2015; Wilson et al., 2022). A exposição subletal também pode ocorrer pela diluição dos depósitos por chuva, orvalho e irrigação e pela degradação fotoquímica, térmica, hidrolítica e microbiológica das moléculas inseticidas (Meng et al., 2022; Ruomeng et al., 2023). Efeito subletal é qualquer alteração mensurável no desenvolvimento, na longevidade, na fecundidade, no comportamento ou na fisiologia de insetos que sobrevivem à exposição a um inseticida em concentrações que não causam morte imediata (De França et al., 2017).

Em geral, todas as moléculas inseticidas podem provocar efeitos subletais em insetos, e de diferentes maneiras (Wu et al., 2022). Inseticidas de origem botânica, por exemplo, degradam-se mais rapidamente em campo por processos

abióticos, o que aumenta a probabilidade de exposição dos insetos a concentrações subletais (Turchen et al., 2020; Collares et al., 2023). Com isso, ensaios para avaliação de efeitos subletais de inseticidas botânicos são facilmente encontrados na literatura, incluindo sobre lepidópteros praga. Exemplos incluem o óleo essencial (OE) de *Eugenia uniflora* (Myrtaceae), que sobre *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) abreviou o desenvolvimento, antecipou a emergência e reduziu o tempo médio de geração (Oliveira et al., 2024). O OE de *Cymbopogon citratus* (Poaceae), também sobre *S. frugiperda*, retardou o desenvolvimento, reduziu a longevidade e a fecundidade, suprimindo o crescimento populacional (Ibrahim et al., 2025). Sobre *Spodoptera littoralis* (Boisduval, 1833), exposições LD₂₀₋₃₀/LC₃₀ a OEs de *Picea abies* e *Pinus sylvestris* (Pinaceae) reduziram a longevidade, retardaram o desenvolvimento e comprometeram a condição reprodutiva (Pavela et al., 2021).

Nos últimos anos, no Brasil, tem crescido o interesse por inseticidas botânicos, acompanhado a demanda do mercado por alternativas mais sustentáveis. Ainda assim, o uso de óleos essenciais e de extratos vegetais enfrentam desafios de estabilidade e padronização dos compostos e reprodutibilidade comercial. Nesse cenário, compostos botânicos isolados têm sido testados por permitirem maior controle de pureza e dose, resultando em desempenho mais consistente. Entre eles, carvacrol e timol, monoterpenos presentes em *Origanum vulgare* e *Thymus vulgaris* (Lamiaceae), têm mostrado efeitos letais e subletais em lepidópteros praga, sobretudo *Spodoptera* spp. e *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) (Lepidoptera: Noctuidae), incluindo retardo no desenvolvimento, inibição do crescimento e redução da fecundidade (Gong e Ren, 2020; Lima et al., 2020; Pengsook et al., 2022; Usseglio et al., 2022; Afrazeh e Sendi, 2025). Outros compostos amplamente estudados, como o monoterpeno 1,8-cineol (eucaliptol), abundante em espécies de *Eucalyptus* spp. (Myrtaceae), provocaram alterações fisiológicas associadas, além de impactos sobre desenvolvimento, longevidade e fecundidade em espécies como *H. armigera*, *S. frugiperda* e *Plutella xylostella* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera: Plutellidae) (Kumrungsee et al., 2014; Afrazeh e Sendi, 2025; Vijitkul et al., 2025).

Embora esteja disponível uma ampla literatura sobre efeitos subletais de inseticidas botânicos em lepidópteros praga, são poucos os relatos em *D.*

saccharalis. Como exemplo, Silva et al. (2013) e Souza Junior et al. (2025) verificaram que o composto botânico azadiractina compromete o desenvolvimento embrionário, provoca anomalias morfológicas e mortalidade nos neonatos de *D. saccharalis*. A maioria dos trabalhos existentes sobre *Diatraea* spp. evidencia efeitos subletais restritos aos inseticidas químicos sintéticos como tebufenozide e lufenurom (Rodriguez et al. 2001; Fonseca et al. 2015) e biológicos como *Bacillus thuringiensis* (Bacillales: Bacillaceae) e *Metarhizium anisopliae* (Hypocreales: Clavicipitaceae) (Guimarães et al. 2015; Daquila et al., 2019; Daquila et al., 2021).

Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos subletais de três compostos botânicos (carvacrol, 1,8-cineol e timol) sobre *D. saccharalis*, acompanhando o ciclo de vida e mensurando parâmetros de desenvolvimento e reprodução. Essas moléculas foram selecionadas pelo potencial inseticida demonstrado em lepidópteros e por seu uso e investigação atuais.

2. Materiais e Métodos

2.1. Local e condições experimentais

O estudo foi conduzido no Laboratório de Biologia e Criação de Insetos (LBCI), localizado na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), em Jaboticabal, São Paulo, Brasil. Os bioensaios foram montados em salas climatizadas por ar-condicionado (Elgin®, São Paulo, SP, Brasil) com temperatura média (25 ± 2 °C), umidade relativa ($70 \pm 10\%$).

2.2. Criação de *Diatraea saccharalis*

Os insetos utilizados nos bioensaios foram obtidos a partir de posturas (ovos) fornecidas pela biofábrica da Usina São Martinho S/A (Pradópolis, SP, Brasil). No LBCI, as colônias foram mantidas conforme o protocolo estabelecido por Vacari et al. (2012). As posturas foram acondicionadas em câmara climatizada B.O.D. (EletroLab®, São Paulo, SP, Brasil) a 25 ± 2 °C, $70 \pm 10\%$ UR e fotoperíodo de 12 h luz:12 h escuro até a eclosão, em seguida foram

acondicionadas em frascos de vidro (400mL) até atingirem o segundo instar larval se alimentando sobre dieta artificial (adaptada de Hensley & Hammond Jr., 1968).

2.3. Reagentes

Os compostos botânicos timol, carvacrol e 1,8-cineol (pureza $\geq 99\%$) foram adquiridos da empresa Quinarí® (Ponta Grossa, PR, Brasil). O dimetilsulfóxido (DMSO; $\geq 99\%$), adquirido da Sigma-Aldrich® (Saint Louis, MO, EUA), foi empregado como co-solvente para facilitar a solubilização dos compostos em água. As soluções foram preparadas em água deionizada e submetidas à agitação por aproximadamente 5 min em agitador magnético com ajuste de temperatura (Fisatom®, São Paulo, SP, Brasil). Para o timol, realizou-se aquecimento a 40 °C, a fim de assegurar a completa emulsificação dos cristais.

2.4. Bioensaios para efeitos subletais (CL_{30}).

Larvas de segundo instar de *D. saccharalis* foram utilizadas nos bioensaios subletais empregando-se a CL_{30} (Wu et al., 2022) previamente determinada para cada composto botânico (carvacrol, 1,8-cineol e timol; ver Capítulo 2) (Tabela 1).

Tabela 1: Resultado da Análise Probit mostrando a toxicidade do Carvacrol, 1,8-cineol e Timol para larvas de 2º instar de *Diatraea saccharalis* (Nascimento et al. 2025).

Composto Botânico	CL_{30} (mg·L ⁻¹) (95% CI)	CL_{50} (mg·L ⁻¹) (95% CI)
Carvacrol	1.01 (0.81–1.22)	2.20 (1.87–2.58)
1,8-Cineol	2.27 (1.87–2.68)	4.43 (3.82–5.14)
Timol	6.14 (4.64–7.58)	9.60 (7.80–11.58)

As soluções foram preparadas em água deionizada contendo 1,0% de DMSO (controle negativo: água + 1,0% DMSO) e aplicadas por pulverização sobre o dorso de larvas de segundo instar de *D. saccharalis* em Torre de Potter (Burkard Manufacturing®, Rickmansworth, Herts, Reino Unido), calibrada a 34,5 kPa, distribuindo-se 2,0 mL por placa de Petri (9,0 × 1,5 cm). Após a aplicação,

as larvas foram transferidas para placas acrílicas (6,0 cm de diâmetro), sendo dez larvas por placa e 15 repetições por tratamento ($n = 150$). As placas foram mantidas em câmara B.O.D. (25 ± 2 °C, $60 \pm 10\%$ UR, 12L:12E), com porção de dieta artificial ao centro. A mortalidade foi inspecionada em 24, 48 e 72 h apenas para verificação pós-exposição; em seguida, os indivíduos sobreviventes foram acompanhados até a fase adulta (geração F_0), registrando-se duração do desenvolvimento larval, taxa de pupação, período pupal, massa pupal (σ , φ), taxa de emergência, longevidade adulta e parâmetros reprodutivos. Para fecundidade e fertilidade, formaram-se 10 casais por tratamento ($1\sigma:1\varphi$) em gaiolas de cano PVC ($30 \times 30 \times 40$ cm), com dieta a base de solução de mel 10% fornecida diariamente, e substrato de oviposição (folhas de papel sulfite) coletado diariamente até a morte das fêmeas. A viabilidade de ovos foi estimada a partir de amostras diárias coletadas e incubadas por 72 h em BOD sob as mesmas condições ambientais.

2.6. Análise Estatística

Os dados de bioensaios (duração larval e pupal, longevidade e peso pupal) foram analisados em Python (pandas, numpy, statsmodels). O peso pupal foi submetido à ANOVA bifatorial (Tratamento $\times$ Sexo); as demais variáveis contínuas, à ANOVA de unifatorial (Tratamento). A normalidade e a homocedasticidade foram verificadas e, quando necessário, aplicaram-se $\log(x+1)$ para tempos/pesos e $\arcsin\sqrt{p}$ para proporções. As comparações múltiplas entre médias foram realizadas pelo teste de Tukey (HSD, $\alpha = 0,05$), e os resultados são apresentados como média $\pm$ SE.

A tabela de vida foi construída no arcabouço *two-sex life table* a partir dos registros diários de postura, estimando, por tratamento, os parâmetros demográficos usuais (R_0, r, λ, T, Dt) e funções idade-específicas (l_x, m_x). As médias, erros-padrão e diferenças entre tratamentos para os parâmetros da tabela de vida foram obtidos por bootstrap pareado ($B = 300$). As análises foram produzidas em Python; adotou-se $\alpha = 0,05$ em todas as inferências.

3. Resultados

Os resultados mostraram que os tratamentos com 1,8-cineol, timol e carvacrol não alteraram significativamente a duração do período larval, do período pupal nem a longevidade adulta em relação ao tratamento controle (Tabela 1). Da mesma forma, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre o peso pupal de fêmeas ou de machos. Nota-se que em todos os tratamentos as pupas das fêmeas são mais pesadas que as dos machos.

Tabela 2. Média ($\pm$ EP) da duração do desenvolvimento e do peso de pupa da geração F_0 de *Diatraea saccharalis* exposta a concentrações subletais dos inseticidas.

Tratamentos	Período Larval (d)	Período Pupal (d)	Longevidade Adulta (d)	Peso Pupal (mg)	
				Fêmeas	Machos
Controle	31.96 $\pm$ 0.74 a	7.97 $\pm$ 0.09 a	4.04 $\pm$ 0.2 a	162.57 $\pm$ 5.19 a	106.49 $\pm$ 3.02 a
1,8-Cineol	31.91 $\pm$ 0.75 a	7.88 $\pm$ 0.13 a	4.68 $\pm$ 0.47 a	171.14 $\pm$ 4.78 a	104.73 $\pm$ 3.1 a
Timol	32.63 $\pm$ 0.76 a	8.0 $\pm$ 0.09 a	4.28 $\pm$ 0.33 a	166.53 $\pm$ 5.02 a	101.71 $\pm$ 3.37 a
Carvacrol	32.73 $\pm$ 0.81 a	7.91 $\pm$ 0.06 a	4.44 $\pm$ 0.38 a	156.71 $\pm$ 5.35 a	103.54 $\pm$ 2.95 a

Dados seguidos de letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey (ANOVA, $p < 0,05$).

Pode-se observar na Tabela 3 que 1,8-cineol, timol e carvacrol afetam a sobrevivência e a fecundidade de *D. saccharalis* em diferentes magnitudes. As taxas de pupação nos tratamentos 1,8-cineol (56,00 $\pm$ 4,00%) e carvacrol (47,33 $\pm$ 4,91), foram significativamente menores do que as do tratamento controle (72,67 $\pm$ 3,06 %) ($F_{3,36} = 6,981$, $p = 0,0008$). As taxas de emergência a proporção de fêmeas nos tratamentos com inseticidas não diferiram do controle.

Tabela 3. Efeito de concentrações subletais de três inseticidas sobre a taxa de sobrevivência e a fecundidade (média $\pm$ EP) da geração F_0 de *Diatraea saccharalis*.

Tratamentos	Taxa de pupação (%)	Taxa de emergência (%)	Proporção de fêmeas (%)	Número de ovos por fêmea	Taxa de eclosão (%)
Controle	72.67 $\pm$ 3.06 a	90.14 $\pm$ 1.92 a	30.21 $\pm$ 3.58 a	371.30 $\pm$ 94.90 a	74.75 $\pm$ 4.91 a
1,8-Cineol	56.00 $\pm$ 4.00 b	80.06 $\pm$ 7.57 a	45.17 $\pm$ 8.37 a	386.90 $\pm$ 98.89 a	32.80 $\pm$ 8.39 b
Timol	60.67 $\pm$ 4.03 a	86.66 $\pm$ 6.33 a	36.92 $\pm$ 6.97 a	443.00 $\pm$ 86.44 a	46.76 $\pm$ 4.41 b
Carvacrol	47.33 $\pm$ 4.91 b	92.35 $\pm$ 2.74 a	48.23 $\pm$ 5.73 a	258.10 $\pm$ 80.04 b	20.51 $\pm$ 6.86 c

Dados seguidos de letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey (ANOVA, $p < 0,05$).

Quanto a fecundidade, o número de ovos por fêmea foi significativamente reduzido quando aplicado o tratamento carvacrol (258.10 ± 80.0) ($F_{3,36} = 3,482$, $p = 0,061$). A taxa de eclosão foi significativamente menor nos tratamentos com inseticidas ($F_{3,36} = 2,859$, $p=0,054$), com valores menores em timol (46.76 ± 4.41), 1,8-cineol ($32,80 \pm 8,39\%$) e carvacrol ($20.51 \pm 6.86 \%$), em comparação ao controle ($74,75 \pm 4,91\%$).

Tabela 4. Efeito de concentrações subletais de três inseticidas sobre os parâmetros populacionais da tabela de vida (média $\pm$ EP) da geração F_0 de *Diatraea saccharalis*.

Tratamentos	Taxa intrínseca de aumento (r_m)	Taxa líquida de reprodução (R_0)	Tempo médio de geração (T)	Taxa finita de aumento (λ)	Tempo de duplicação populacional (D_t)
Controle	0.123 ± 0.001	144.00 ± 34.92	32.42 ± 0.04	1.131 ± 0.001	5.71 ± 0.04
1,8-Cineol	0.120 ± 0.001	113.78 ± 34.24	31.52 ± 0.04	1.127 ± 0.001	5.83 ± 0.03
Timol	0.128 ± 0.000	130.50 ± 18.96	33.11 ± 0.06	1.136 ± 0.001	5.46 ± 0.02
Carvacrol	0.087 ± 0.001	67.64 ± 23.66	31.76 ± 0.05	1.091 ± 0.001	8.25 ± 0.10

Os parâmetros da tabela de vida revelam impacto principalmente do carvacrol (Tabela 4). Em comparação ao controle, o R_0 caiu de $144,00 \pm 34,92$ para $67,64 \pm 23,66$ (redução $\sim 53\%$), a taxa intrínseca de aumento (r_m) diminuiu de $0,123 \pm 0,001$ para $0,087 \pm 0,001$, e a taxa finita de aumento (λ) passou de $1,131 \pm 0,001$ para $1,091 \pm 0,001$; em consequência, o tempo de duplicação (D_t) aumentou de $5,71 \pm 0,04$ d para $8,25 \pm 0,10$ d. O tempo médio de geração (T) permaneceu semelhante entre os tratamentos ($\approx 31\text{--}33$ d). Para 1,8-cineol e timol, os valores de R_0 , r_m , λ , T e D_t foram comparáveis ao controle indicando ausência de efeito demográfico consistente nessas condições subletais.

4. Discussão

Os resultados deste estudo indicam que a exposição a concentrações subletais dos compostos botânicos 1,8-cineol, carvacrol e timol modificaram o desempenho biológico de *D. saccharalis*. Em termos práticos, concentrações subletais de inseticidas podem acelerar ou retardar o desenvolvimento e aumentar ou reduzir longevidade, fecundidade e sobrevivência de insetos (Zhou et al., 2021; Kinareikina e Silivanova, 2023; Kim et al., 2024; Sancho et al., 2025). Importante destacar que acelerações ou aumentos desses parâmetros, quando

comparados ao grupo controle, geralmente não representam benefício, mas indicam estresse ou perturbação fisiológica (De França et al., 2017; Bartling et al., 2024). Concentrações subletais também alteram comportamentos dos insetos, como mobilidade, oviposição, navegação, alimentação, aprendizado e memória, com potencial impacto na comunicação química e na competição intraespecífica (Joncour et al., 2021; Gándara et al., 2024; Sancho et al., 2025).

Neste estudo, 1,8-cineol, carvacrol e timol promoveram pequenas variações na duração dos períodos larval e pupal e na longevidade adulta de *D. saccharalis*; contudo, essas alterações não foram estatisticamente significativas em relação ao controle. Em contraste, parâmetros de sobrevivência, fecundidade e da tabela de vida apresentaram mudanças detectáveis. Esse padrão é coerente com hormese de baixa magnitude, em que subdoses tendem a modular, sobretudo, traços reprodutivos e fisiológicos (Guedes e Cutler, 2014; Rix e Cutler, 2022; Ayyanath et al., 2013; Rix et al., 2016; Liu et al., 2023; Yang et al., 2024). Resultados semelhantes foram relatados sob exposição subletal a diamidas em *Helicoverpa assulta* (Guenée, 1852) e *Spodoptera* spp., com pouca ou nenhuma mudança significativa na duração do período pupal e na longevidade adulta, e alterações em outros parâmetros da tabela de vida (Song et al., 2014; Dong et al., 2017; Wu et al., 2022; Un-Nisa et al., 2023). Jia et al. (2023) testaram três concentrações subletais (LC₁, LC₁₀ and LC₃₀) de clorfenapir sobre *P. xylostella*, sem efeitos significativos na duração do período larval e pupal e na longevidade adulta, o que reforça a interpretação de respostas discretas na duração do ciclo da praga em baixas doses.

Outras possíveis explicações incluem a mortalidade seletiva, em que o inseticida elimina as larvas mais suscetíveis e preserva as mais resistentes, mantendo as médias de desenvolvimento próximas ao controle (Wu et al., 2022). Além disso, a alta volatilidade e instabilidade dos monoterpenos (1,8-cineol, timol e carvacrol), pode reduzir a persistência e a dose interna efetiva absorvida pelos organismos, tornando a exposição ainda mais baixa e, conseqüentemente, atenuando os efeitos sobre alguns parâmetros de história de vida (Turek e Stintzing, 2013; Sadgrove et al., 2022; Sousa et al., 2022).

A alta volatilidade dos inseticidas botânicos reforça a importância da investigação de seus efeitos subletais, uma vez que, mesmo quando aplicados em doses recomendadas em campo, as pragas-alvo podem ser expostas a

subdoses devido à deriva na pulverização, à volatilização e à degradação pós-aplicação no tempo e no espaço (Müller, 2018; Boonupara et al., 2023; Albaseer et al., 2025). Como estratégia para mitigar essas limitações, a micro/nanoencapsulação de inseticidas botânicos tem se mostrado eficaz em aumentar a estabilidade, reduzir a volatilidade e viabilizar liberação controlada, frequentemente resultando em maior eficácia biológica (Maes et al., 2019; Sousa et al., 2022).

Estudos anteriores relataram que inseticidas tiveram efeitos subletais na redução das taxas de pupação de pragas e taxas de emergência de adultos (Khan, 2021; Wu et al., 2022; Jia et al., 2023; Lisi et al., 2023). Incluindo inseticidas de origem botânica (Abdelgaleil et al., 2022; Sharifiyan et al., 2024). No presente estudo, embora a taxa de pupação de *D. saccharalis* tenha caído 23% sob exposição a 1,8-cineol e 35% sob exposição a carvacrol, a taxa de emergência de adultos e a proporção de fêmeas na geração parental não foram significativamente afetadas. A redução da taxa de pupação indica mortalidade concentrada na transição larva–pupa, diminuindo o contingente reprodutivo e, por consequência, R_0 e r_m , o que desacelera o crescimento populacional mesmo na ausência de alterações na duração dos estágios (Zhu et al., 2022; Chen et al., 2025).

Para os compostos testados nesse experimento, esses efeitos já são conhecidos. 1,8-Cineol reduziu drasticamente a taxa de pupação e a emergência de adultos em *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) (Gharib et al., 2024). Sobre *S. littoralis*, 1,8-cineol reduziu as taxas de pupação e foi o composto mais eficaz na redução da emergência de adultos, apenas 13,3% em altas doses (Abdelgaleil et al., 2022). Carvacrol foi capaz de reduzir taxas de pupação e emergência de *C. pipiens* e *C. pipiens* biotipo *molestus* (Diptera: Culicidae) (Youssefi et al., 2019; Giatropoulos et al., 2023). O mecanismo de ação do carvacrol atua sobre o intestino médio, danificando-o, e pode alterar a microbiota larval, comprometendo a metamorfose e elevando a mortalidade pupal. O 1,8-cineol exibe ação neurotóxica associada à inibição de acetilcolinesterase e disfunções neuromusculares, o que contribui para a menor emergência sob exposições subletais (Rants'o et al., 2022; Yang et al., 2024)

Em relação ao parâmetro fecundidade, apenas o carvacrol reduziu o número de ovos por fêmea. No entanto a viabilidade dos ovos caiu

acentuadamente em todos os tratamentos. Esse padrão é coerente com a literatura sobre monoterpenos, que frequentemente afetam a reprodução por múltiplas vias: (i) efeitos ovipositórios/oviposição (repelência e redução do número de ovos), (ii) impacto direto na viabilidade dos ovos (atividade ovicida e alterações na permeabilidade/respiração do córion), e (iii) disfunções fisiológicas que repercutem na embriogênese (neurotoxicidade, estresse oxidativo e perturbações da microbiota que afetam a metamorfose) (Regnault-Roger e Hamraoul, 1995; Manning e Reid, 2013; El-Minshawy et al., 2018; Finetti et al., 2021; Wojtunik-Kulesza, 2022). Exemplos incluem a redução de fertilidade e da viabilidade de ovos por óleos ricos em 1,8-cineol, ou o próprio composto isolado em pragas, bem como reduções consideráveis na eclosão (Ebadollahi et al., 2022; Čmíková et al., 2023; Achouri et al., 2024). No caso do carvacrol e timol, compostos que são isômeros, estudos como os já evidenciados no parágrafo anterior mostram dano ao intestino médio larval e alteração da microbiota, alterações que podem comprometer a metamorfose e, indiretamente, a qualidade reprodutiva dos adultos (Szczepanik et al., 2012; Zhang et al., 2024).

Os parâmetros da tabela de vida da geração F_0 evidenciam impactos contrastantes entre os compostos. O carvacrol promoveu a maior supressão populacional, com reduções de 29% em r_m , 3% em R_0 e 3.5% em λ , e com aumento do tempo de duplicação em 44%, enquanto o tempo médio de geração permaneceu semelhante (≈ 32 dias). Esse padrão é coerente com a redução da pupação/eclosão e com mecanismos de ação já descritos para o composto, que reduz a emergência de adultos e a fertilidade efetiva (Giatropoulos et al., 2023; Yang et al., 2024; Zhang et al., 2024). O composto 1,8-cineol, promoveu reduções moderadas (r_m 0,120; R_0 113,78; λ 1,127; D_t 5,83), compatíveis com efeito ovicida/neurotóxico que diminui a eclosão sem alterar a cronologia do ciclo (Rants'o et al., 2022). Timol manteve índices próximos ao controle (r_m 0,128; λ 1,136; D_t 5,46), apesar da menor eclosão, sugerindo compensações como manutenção de fecundidade e tempos de desenvolvimento que amorteceram o impacto demográfico.

Em conjunto, nossos resultados indicam que, mesmo sem alterar a duração dos estágios de vida, carvacrol converte perdas em pupação/eclosão, uma redução efetiva do potencial de crescimento de *D. saccharalis*, enquanto 1,8-cineol exerce efeito intermediário, e timol não causa efeitos significativos

estatisticamente nas condições testadas. Contudo, janelas subletais repetidas podem induzir hormese e selecionar resistência (P450/esterases/GST, via CncC/Keap1-Nrf2) (Bartling et al., 2024; Hu et al., 2025; Wang et al., 2025). Portanto, recomenda-se minimizar subdoses, rotacionar modos de ação e monitorar suscetibilidade (r_m , R_0), integrando as moléculas de origem botânica a táticas não químicas no MIP para preservar eficácia e sustentabilidade.

5. Conclusão

Exposições subletais a 1,8-cineol, carvacrol e timol não alteraram a duração dos estágios imaturos nem a longevidade adulta de *D. saccharalis*, mas afetaram componentes-chave de aptidão. O carvacrol foi o mais eficaz em suprimir o crescimento populacional, reduzindo pupação e eclosão e refletindo-se em queda de R_0 e r_m e aumento do D_t ; 1,8-cineol mostrou efeito intermediário centrado na viabilidade dos ovos; o timol manteve perfil demográfico próximo ao controle. Esses resultados indicam que, mesmo sem modificar a cronologia do ciclo, monoterpenos podem desacelerar a dinâmica populacional ao atingir pupação, fecundidade e viabilidade.

6. Referências

Abdelgaleil SAM, Al-Nagar NMA, Abou-Taleb HK, Shawir MS (2022) Effect of monoterpenes, phenylpropenes and sesquiterpenes on development, fecundity and fertility of *Spodoptera littoralis* (Boisduval). **International Journal of Tropical Insect Science** 42:245-253. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00539-y>

Achouri S, Chaabane SB, Mahmoudi I, Mahjoubi K, Haouel-Hamdi S, Mediouni Ben Jemâa J (2024) Insecticidal potential of *Eucalyptus cinerea* essential oil and its major constituent 1,8-cineole against *Ectomyelois ceratoniae* Zeller and *Ephestia kuehniella* Zeller (Pyralidae). **International Journal of Environmental Health Research** 34(12):4033-4046. <https://doi.org/10.1080/09603123.2024.2337834>

Afrazeh Z, Sendi JJ (2025) Eco-friendly control of *Helicoverpa armigera* using synergistic mixtures of thymol and eucalyptol. **Scientific Reports** 15:26974. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12752-7>

Albaseer SS, Jaspers VLB, Orsini L, Vlahos P, Al-Hazmi HE, Hollert H (2025) Beyond the field: How pesticide drift endangers biodiversity. **Environmental Pollution** 366:125526. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125526>

Alves RBDO, Tomasiello DB, Almeida CMD, Rosalen DL, Pereira LH, Silva HPD, Rodrigues CL (2024) Agent-Based spatial dynamic modeling of *Diatraea saccharalis* and the natural parasites *Cotesia flavipes* and *Trichogramma galloi* in sugarcane crops. **Remote Sensing** 16(15):2693. <https://doi.org/10.3390/rs16152693>

Ayyanath M-M, Cutler GC, Scott-Dupree CD, Sibley PK (2013) Transgenerational shifts in reproduction hormones in green peach aphid exposed to low concentrations of imidacloprid. **PLoS ONE** 8:e74532. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074532>

Bartling M-T, Brandt A, Hollert H, Vilcinskis A (2024) Current insights into sublethal effects of pesticides on insects. **IJMS** 25:6007. <https://doi.org/10.3390/ijms25116007>

Boonupara T, Udomkun P, Khan E, Kajitvichyanukul P (2023) Airborne pesticides from agricultural practices: A critical review of pathways, influencing factors, and human health implications. **Toxics** 11(10):858. <https://doi.org/10.3390/toxics11100858>

Chen C, Tang Y, Zhao Y, Zhang X, Zhang Y (2025) Life table study of sublethal concentrations of emamectin benzoate against *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera, Noctuidae). **Journal of Insect Science** 25(1):17. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieaf014>

Collares LJ, Turchen LM, Guedes RNC (2023) Research trends, biases, and gaps in phytochemicals as insecticides: Literature survey and meta-analysis. **Plants** 12:318. <https://doi.org/10.3390/plants12020318>

Daquila BV, Dossi FC, Moi DA, Moreira DR, Caleffe RR, Pamphile JA, Conte H (2021) Bioactivity of *Bacillus thuringiensis* (Bacillales: Bacillaceae) on *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) eggs. **Pest Management Science** 77(4):2019-2028. <https://doi.org/10.1002/ps.6230>

Daquila BV, Scudeler EL, Dossi FCA, Moreira DR, Pamphile JA, Conte H (2019) Action of *Bacillus thuringiensis* (Bacillales: Bacillaceae) in the midgut of the sugarcane borer *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae). **Ecotoxicology and Environmental Safety** 184:109642. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109642>

De França SM, Breda MO, Barbosa DRS, Araujo AM, Guedes CA, Shields VD C. (2017) The sublethal effects of insecticides in insects. In: Shields VDC (ed) **Biological control of pest and vector insects**. Rijeka: InTech, p. 24-32.

Dong J, Wang K, Li Y, Wang S (2017) Lethal and sublethal effects of cyantraniliprole on *Helicoverpa assulta* (Lepidoptera: Noctuidae). **Pesticide**

Biochemistry and Physiology 136:58-63.
<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2016.08.003>

Ebadollahi A, Naseri B, Abedi Z, Setzer WN, Changbunjong T (2022) Promising insecticidal efficiency of essential oils isolated from four cultivated *Eucalyptus* species in Iran against the Lesser Grain Borer, *Rhyzopertha dominica* (F.). **Insects** 13(6):517. <https://doi.org/10.3390/insects13060517>

El-Minshawy AM, Abdelgaleil SAM, Gadelhak GG, Al-Eryan MA, Rabab RA (2018) Effects of monoterpenes on mortality, growth, fecundity, and ovarian development of *Bactrocera zonata* (Saunders) (Diptera: Tephritidae). **Environmental Science and Pollution Research** 25:15671-15679. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1780-1>

Finetti L, Tiedemann L, Zhang X, Civolani S, Bernacchia G, Roeder T (2021) Monoterpenes alter TAR1-driven physiology in *Drosophila* species. **Journal of Experimental Biology** 224(1):jeb232116. <https://doi.org/10.1242/jeb.232116>

Fonseca APP, Marques EJ, Torres JB, Silva, LM, Siqueira HÁA (2015) Lethal and sublethal effects of lufenuron on sugarcane borer *Diatraea flavipennella* and its parasitoid *Cotesia flavipes*. **Ecotoxicology** 24(9):1869-1879. <https://doi.org/10.1007/s10646-015-1523-8>

Foqué D, Nuyttens D (2011) Effects of nozzle type and spray angle on spray deposition in ivy pot plants. **Pest Management Science** 67:199-208. <https://doi.org/10.1002/ps.2051>

Forster WA, Kimberley MO (2015) The contribution of spray formulation component variables to foliar uptake of agrichemicals. **Pest Management Science** 71:1324-1334. <https://doi.org/10.1002/ps.3934>

Gharib AM, El-Shewy AM, Hamouda SSA, Gad HA, Abdelgaleil SA (2024) Insecticidal, biochemical and histological effects of monoterpenes against *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). **Journal of Asia-Pacific Entomology** 27(2):102256. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2024.102256>

Giatropoulos A, Koliopoulos G, Pantelakis P-N, Papachristos D, Michaelakis A (2023) Evaluating the Sublethal Effects of *Origanum vulgare* essential oil and carvacrol on the biological characteristics of *Culex pipiens* biotype *molestus* (Diptera: Culicidae). **Insects** 14(4):400. <https://doi.org/10.3390/insects14040400>

Gong X, Ren Y (2020) Larvicidal and ovicidal activity of carvacrol, p-cymene, and β -terpinene from *Origanum vulgare* essential oil against the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hubner). **Environmental Science and Pollution Research** 27:18708-18716. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08391-2>

Guedes RNC, Cutler GC (2014) Insecticide-induced hormesis and arthropod pest management. **Pest Management Science** 70:690-697. <https://doi.org/10.1002/ps.3669>

Guimarães J, Marques EJ, Wanderley-Teixeira V, et al (2014) Sublethal effect of concentrations of *Metarhizium anisopliae* (metsch.) sorok on the larval stage and immunologic characteristics of *Diatraea flavipennella* (box) (lepidoptera: crambidae). **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 86(4):1973-1984. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201420130339>

Hu B, Deng Y, Lu T, Ren M, Liu K, Rao C, Gao H, Su J (2025) Inhibition of transcriptional regulation of detoxification genes contributes to insecticide resistance management in *Spodoptera exigua*. **Communications Biology** 8(1):128. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-07560-8>

Ibrahim SS, El-Kholy MY, Shalaby SE-SM (2025) Insecticidal effects of nano-encapsulated lemongrass essential oil on the population parameters of *Spodoptera frugiperda* using two-sex life table. **Scientific Reports** 15(1):11138. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93779-8>

Jia B, Zhang J, Hong S, Chang X, Li X (2023) Sublethal effects of chlorfenapyr on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). **Pest Management Science** 79(1):88-96. <https://doi.org/10.1002/ps.7175>

Khan HAA (2021) Pyriproxyfen induces lethal and sublethal effects on biological traits and demographic growth parameters in *Musca domestica*. **Ecotoxicology** 30:610-621. <https://doi.org/10.1007/s10646-021-02394-6>

Kim SE, Kim HK, Kim GH (2024) Sublethal Effects of Spirotetramat, Cyantraniliprole, and Pymetrozine on *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae). **Insects** 15(4):247. <https://doi.org/10.3390/insects15040247>

Kinareikina A, Silivanova E (2023) Impact of insecticides at sublethal concentrations on the enzyme activities in adult *Musca domestica* L. **Toxics** 11(1):47. <https://doi.org/10.3390/toxics11010047>

Kumrungsee N, Pluempunupat W, Koul O, Bullangpoti V (2014) Toxicity of essential oil compounds against diamondback moth, *Plutella xylostella*, and their impact on detoxification enzyme activities. **Journal of Pest Science** 87(4):721-729. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0602-6>

Lima APS, Santana EDR, et al (2020) Insecticide activity of botanical compounds against *Spodoptera frugiperda* and selectivity to the predatory bug *Podisus nigrispinus*. **Crop Protection** 136:105230. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105230>

Lisi F, Mansour R, et al (2023) Sublethal effects of nine insecticides on *Drosophila suzukii* and its major pupal parasitoid *Trichopria drosophilae*. **Pest Management Science** 79(12):5003-5014. <https://doi.org/10.1002/ps.7702>

Liu J, Lin Y, Huang Y, Liu L, Cai X, Lin J, Shu B (2023) The effects of carvacrol on development and gene expression profiles in *Spodoptera frugiperda*. **Pesticide Biochemistry and Physiology** 195:105539. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105539>

Lopes AB, Sousa BB, Oliveira RAPD, Guimarães CRR, Cerqueira FB (2022) Avaliação tecnológica de quatro cultivares de cana-de-açúcar em função da infestação de *Diatraea saccharalis* em Pedro Afonso, TO - estudo de caso. **Research, Society and Development** 11(13):e340111335388. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35388>

Maes C, Bouquillon S, Fauconnier M-L (2019) Encapsulation of essential oils for the development of biosourced pesticides with controlled release: A Review. **Molecules** 24(14):2539. <https://doi.org/10.3390/molecules24142539>

Manning CG, Reid ML (2013) Sub-lethal effects of monoterpenes on reproduction by mountain pine beetles. **Agricultural and Forest Entomology** 15(3):262-271. <https://doi.org/10.1111/afe.12013>

Meng X, Guo Y, Wang Y, Fan S, Wang K, Han W (2022) A Systematic review of photolysis and hydrolysis degradation modes, degradation mechanisms, and identification methods of pesticides. **Journal of Chemistry** 2022(1):9552466. <https://doi.org/10.1155/2022/9552466>

Müller C (2018) Impacts of sublethal insecticide exposure on insects - Facts and knowledge gaps. **Basic and Applied Ecology** 30:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.05.001>

Oliveira JAC, Fernandes LA, Figueiredo KG, Corrêa EJ, Lima LH, Alves DS, Bertolucci SKV, Carvalho GA (2024) Effects of essential oils on biological characteristics and potential molecular targets in *Spodoptera frugiperda*. **Plants** 13(13):1801. <https://doi.org/10.3390/plants13131801>

Pengsook A, Tharamak S, Keosaeng K, Koul O, Bullangpoti V, Kumrungsee N, Pluempanupat W (2022) Insecticidal and growth inhibitory effects of some thymol derivatives on the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and their impact on detoxification enzymes. **Pest Management Science** 78(2):684-691. <https://doi.org/10.1002/ps.6678>

Rants'o TA, Koekemoer LL, Panayides J-L, Van Zyl RL (2022) Potential of Essential Oil-Based anticholinesterase insecticides against *Anopheles* Vectors: A Review. **Molecules** 27(20):7026. <https://doi.org/10.3390/molecules27207026>

Regnault-Roger C, Hamraoui A (1995) Fumigant toxic activity and reproductive inhibition induced by monoterpenes on *Acanthoscelides obtectus* (Say) (coleoptera), a bruchid of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Stored Products Research** 31(4):291-299. [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(95\)00025-3](https://doi.org/10.1016/0022-474X(95)00025-3)

Rix RR, Ayyanath MM, Cutler GC (2016) Sublethal concentrations of imidacloprid increase reproduction, alter expression of detoxification genes, and prime *Myzus persicae* for subsequent stress. **Journal of Pest Science** 89:581-589. <https://doi.org/10.1007/s10340-015-0716-5>

Rix RR, Cutler GC (2022) Review of molecular and biochemical responses during stress induced stimulation and hormesis in insects. **Science of The Total Environment** 827:154085. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154085>

Rodriguez LM, Reagan TE, Ottea JA (2001) Susceptibility of *Diatraea saccharalis* to Tebufenozide. **Journal of Economic Entomology** 94(6):1464-1470. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.6.1464>

Ruomeng B, Meihao O, et al (2023) Degradation strategies of pesticide residue: From chemicals to synthetic biology. **Synthetic and Systems Biotechnology** 8(2):302-313. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2023.03.005>

Sadgrove N, Padilla-González G, Phumthum M (2022) Fundamental chemistry of essential oils and volatile organic compounds, methods of analysis and authentication. **Plants** 11(6):789. <https://doi.org/10.3390/plants11060789>

Sancho G, Albacete S, Azpiazu C, Sgolastra F, Rodrigo A, Bosch J (2025) A phototaxis assay to measure sublethal effects of pesticides on bees. **Scientific Reports**, 15(1):22136. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05400-7~>

Sharifiyan M, Mehrkhou F, Negahban M (2024) Sublethal effects of nanoformulated *Mentha pulegium* essential oil on the biological and population growth parameters of the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum*. **Scientific Reports** 14:27357. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78249-x>

Silva-Brandao KL, Santos TV, Consoli FL, Omoto C (2015) Genetic diversity and structure of brazilian populations of *Diatraea saccharalis*: implications for pest management. **Journal of Economic Entomology** 108:307-316. <https://doi.org/10.1093/jee/tou040>

Somjit C, Kumrungsee N, Pluempanupat W, Bullanpotil V (2015) Insecticidal activities of thymol on egg production and development in the diamondback moth, *Plutella xylostella*. **Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences** 80(2):187-192.

Song S, Shu B, Hu M, Ang Z, Zhong G (2014) Sublethal effects of cyantraniliprole on the development and reproduction of the cabbage cutworm, *Spodoptera litura*. **Journal of South China Agricultural University** 35(5):64-68. <https://doi.org/10.7671/j.issn.1001-411X.2014.05.011>

Sousa VI, Parente JF, Marques JF, Forte MA, Tavares CJ (2022) Microencapsulation of Essential Oils: A Review. **Polymers** 14(9):1730. <https://doi.org/10.3390/polym14091730>

Souza Junior SLD, Silva AADD, et al (2025) Azadirachtin A and B: A New Biological Tool to a Sustainable Management of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae). **Brazilian Archives of Biology and Technology** 68:e25240188. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2025240188>

Turchen LM, Cosme-Júnior L, Guedes RNC (2020) Plant-derived insecticides under meta-analyses: status, biases, and knowledge gaps. **Insects** 11(8):532. <https://doi.org/10.3390/insects11080532>

Turek C, Stintzing FC (2013) Stability of essential oils: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety** 12:40-53. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12006>

Un-Nisa E, Ahmad M, Sheikh UAA, Perveen N, Rahim J (2023) Lethal and sublethal effects of flubendiamide and spirotetramat against the leaf worm, *Spodoptera litura* under laboratory conditions. **PeerJ** 11:e15745. <https://doi.org/10.7717/peerj.15745>

Usseglio VL, Dambolena JS, Zunino MP (2022) Can essential oils be a natural alternative for the control of *Spodoptera frugiperda*? A review of toxicity methods and their modes of action. **Plants** 12(1):3. <https://doi.org/10.3390/plants12010003>

Vijitkul P, Pluempanupat W, Piyasaengthong N, Bullangpoti V (2025) Insecticidal activities of essential oil from *Hedychium coronarium* rhizome and its mixture of compounds against *Spodoptera frugiperda*. **Pesticide Biochemistry and Physiology** 208:106293. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106293>

Wang B, Hui H, Li X, Yang X, Li Y (2025) Sublethal effects of abamectin and acetamiprid on the longevity, fecundity and detoxification enzyme activity of *Rhopalosiphum padi*. **Insects** 16(6):629. <https://doi.org/10.3390/insects16060629>

Wilson BE, Salgado LD, Villegas JM (2022) Optimizing chemical control for *Diatraea saccharalis* in sugarcane. **Crop Protection** 152:105843. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105843>

Wojtunik-Kulesza KA (2022) Toxicity of selected monoterpenes and essential oils rich in these compounds. **Molecules** 27(5):1716. <https://doi.org/10.3390/molecules27051716>

Wu H-M, Feng H-L, Wang G-D, Zhang LL, Zulu L, Liu YH, Rao Q (2022) Sublethal effects of three insecticides on development and reproduction of *Spodoptera frugiperda*. **Agronomy** 12(6):1334. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061334>

Yang J, Chen Y-Z, Zhang G-C (2024) The impact of carvacrol on the larval gut bacterial structure and function of *Lymantria dispar*. **Frontiers in Microbiology** 15:1417598. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1417598>

Youssefi MR, Tabari MA, et al (2019) Efficacy of two monoterpenoids, carvacrol and thymol, and their combinations against eggs and larvae of the west Nile vector *Culex pipiens*. **Molecules** 24(10):1867. <https://doi.org/10.3390/molecules24101867>

Zhou X, Zhang Z, Zheng H, Zhang Q, Gong J, Li C, Wang R (2021) Physiological and biochemical responses to sublethal concentrations of the novel pyropene insecticide, afidopyropen, in *Bemisia tabaci* MED (Q Biotype). **Agronomy** 11(11):2260. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112260>

Zhu Y, Qi F, Tan X, Teng Z, Fan Y, Wan F, Zhou H (2022) Use of age-stage, two-sex life table to compare the fitness of *Bactrocera dorsalis* on Northern and Southern host fruits in China. **Insects** 13(3):258. <https://doi.org/10.3390/insects13030258>

CAPÍTULO 4: Efeitos de inseticidas botânicos sobre o consumo e sobrevivência de *Xylocoris sordidus* (Hemiptera: Anthocoridae) alimentado com ovos tratados de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae).

RESUMO - Este estudo objetivou avaliar a seletividade dos inseticidas botânicos timol, carvacrol e 1,8-cineol sobre o predador *Xylocoris sordidus* (Hemiptera: Anthocoridae), utilizando-se ovos de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) tratados com os compostos em questão. Foram conduzidos bioensaios de toxicidade por contato e ingestão, bem como testes subletais de consumo de presas, utilizando ninfas de quarto instar e adultos. A via por contato foi mais tóxica que a oral para todos os compostos e estágios do inseto avaliados. Timol e carvacrol apresentaram maior toxicidade, enquanto 1,8-cineol foi o menos nocivo. No teste de consumo, *X. sordidus* manteve maior atividade predatória quando exposto a ovos tratados com 1,8-cineol, indicando menor interferência comportamental e fisiológica. Já timol e carvacrol reduziram significativamente o consumo, possivelmente por efeitos combinados de deterrência e estresse fisiológico. Os resultados indicam que 1,8-cineol apresenta maior compatibilidade para uso associado com *X. sordidus*, sendo potencialmente utilizável em programas de manejo integrado de pragas (MIP) em cana-de-açúcar.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, percevejo predador, MIP, inseticidas botânicos, timol, carvacrol, 1,8-cineol.

1. Introdução

As pragas agrícolas representam um dos principais desafios à produção vegetal, gerando perdas expressivas e elevando os custos de manejo e produção. Para combatê-las, o controle químico com inseticidas sintéticos, amplamente adotado desde a Revolução Verde, trouxe ganhos significativos em produtividade, mas também provocou impactos ambientais, riscos à saúde humana e entraves à sustentabilidade agrícola (Gomes et al., 2020; Rani et al., 2021; Tudi et al., 2021; Zhou et al., 2025). O uso intensivo desses produtos, pode resultar em contaminação ambiental, seleção de pragas resistentes, redução de inimigos naturais e perda de biodiversidade (Sánchez-Bayo, 2021; Serrão et al., 2022; Apoorva e Kundlas, 2024). Esse contexto motivou a adoção do Manejo Integrado de Pragas (MIP), que propõe a integração de diferentes estratégias de controle de forma racional, sustentável e econômica, destacando-se os biopesticidas, como os entomopatógenos e os inseticidas botânicos (Baker et al., 2020; Sharma et al., 2020; Qasim et al., 2024).

Inseticidas botânicos são obtidos a partir da extração de metabólitos produzidos pelo metabolismo secundário das plantas, como parte de sua estratégia evolutiva de defesa contra herbívoros. Entre esses compostos destacam-se alcaloides, terpenos e flavonoides, que frequentemente apresentam ação tóxica, repelente, antialimentar e/ou reguladora do crescimento de insetos (Yactayo-Chang et al., 2020; Barik, 2021). Destacam-se por sua biodegradabilidade, baixa toxicidade para mamíferos, menor risco de seleção de resistência e possibilidade de produção a partir de fontes vegetais renováveis (Hikal et al., 2017; Ahmed et al., 2020; Isman, 2020). Mas, apesar dessas vantagens, enfrentam limitações como variação na composição química, baixa persistência, pesquisas com falhas metodológicas, barreiras regulatórias e potenciais efeitos adversos sobre organismos não-alvo, incluindo mortalidade e alterações fisiológicas ou comportamentais (Isman e Grieneisen, 2014; Ndakidemi et al., 2016; Isman, 2020; Casas et al., 2022; Giunti et al., 2022).

Diversos estudos têm evidenciado efeitos negativos de compostos botânicos sobre organismos não-alvo (Ghasemzadeh et al., 2022; Hassan et al., 2023; Sulg et al., 2023). Como exemplo, óleos essenciais de *Pimpinella anisum* (Apiales: Apiaceae), *Ocimum basilicum* (Lamiales: Lamiaceae), *Coriandrum*

sativum (Apiales: Apiaceae), *Origanum vulgare* (Lamiales: Lamiaceae), *Mentha* × *piperita* e *Thymus vulgaris* (Lamiales: Lamiaceae), aplicados por fumigação, mostraram-se tóxicos ao parasitoide de ovos *Trichogramma evanescens* Westwood (Hymenoptera: Trichogrammatidae) (van Oudenhove et al., 2023). De forma similar, os óleos de *Gaultheria procumbens* (Ericales: Ericaceae) e *Syzygium aromaticum* (Myrtales: Myrtaceae) causaram 100% de mortalidade nos predadores *Orius laevigatus* (Fieber) (Hemiptera: Anthocoridae) e *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) (Hemiptera: Miridae) (Şen e Gençe, 2023). Além disso, compostos isolados de óleos essenciais de plantas tendem a apresentar toxicidade ainda mais pronunciada do que os óleos em sua forma integral, afetando tanto organismos-alvo quanto não-alvo (Gonzaga et al., 2023; Damascena et al., 2025).

Entre os compostos mais testados como inseticidas destacam-se o timol, o carvacrol e o 1,8-cineol (eucaliptol). O timol mostrou-se tóxico para *Cotesia plutellae* (Kurdjumov) (Hymenoptera: Braconidae) (Yotavong et al., 2015) e *Chrysoperla externa* Hagen (Neuroptera: Chrysopidae) (Castilhos et al., 2018). Seu isômero carvacrol também demonstrou toxicidade para *C. externa* e *A. mellifera* (Castilhos et al., 2018; Glavan et al., 2020). No caso do 1,8-cineol, embora ainda faltem evidências específicas sobre sua forma isolada em organismos não-alvo, efeitos tóxicos sobre abelhas já foram observados em estudos com óleos essenciais ricos nesse composto (Ribeiro et al., 2018; Gostin e Popescu, 2023). Esses estudos reforçam a importância de avaliar sua seletividade antes de recomendá-los em programas de manejo. Assim, testes de toxicidade e de efeitos subletais sobre predadores e parasitoides são fundamentais para garantir que o uso desses produtos esteja alinhado aos princípios do MIP.

A avaliação da toxicidade e dos efeitos subletais de inseticidas sobre predadores exige metodologias que reflitam condições de exposição semelhantes às observadas no campo. Uma estratégia amplamente empregada consiste na aplicação do produto diretamente sobre a presa, simulando a deposição de resíduos resultante da pulverização agrícola. Após a secagem ou tempo pré-estabelecido, as presas tratadas são oferecidas ao predador em bioensaios laboratoriais, permitindo a análise de parâmetros como taxa de predação, comportamento alimentar e sobrevivência (Pimenta et al., 2020;

Santos et al., 2020; Silva et al., 2020; Suárez-López et al., 2020; Arroyo et al., 2023).

Entre os predadores, *Xylocoris sordidus* (Reuter) (Hemiptera: Anthocoridae) destaca-se como um percevejo de hábito generalista, com dieta baseada em pequenos artrópodes e ovos de insetos, apresentando alto potencial para uso em programas de controle biológico (Santos, 2020; Oliveira et al., 2024). Ensaio de seletividade já foram conduzidos com essa espécie frente a inseticidas químicos e biológicos, evidenciando tanto efeitos letais quanto subletais (Santos et al., 2020; Estevão et al., 2022). O uso de ovos de *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae) como presa artificial tem sido adotado nesses estudos, dada relevância agrícola da praga e ocorrência do predador em Jaboticabal, SP, Brasil (Pedroso et al., 2009; Estevão et al., 2022; Nunes, 2023), município cuja paisagem agrícola é composta principalmente por cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. (Poales: Poaceae)) e amendoim (*Arachis hypogaea*) (Fabales: Fabaceae) (Farinelli et al., 2018; Santos et al., 2019; Noronha e Figueira, 2021; Miyoshi et al., 2024). Nesse contexto, torna-se pertinente investigar os efeitos de inseticidas botânicos aplicados sobre ovos de *D. saccharalis*, considerando que diversos compostos de origem vegetal já demonstraram atividade inseticida sobre a praga (Lacerda et al., 2024; Souza Júnior et al., 2025) e potencial impacto sobre inimigos naturais.

Com base no exposto, o objetivo do presente estudo foi avaliar a seletividade dos inseticidas botânicos 1,8-cineol, carvacrol e timol, aplicados sobre ovos de *D. saccharalis*, em relação ao predador de ovos *X.sordidus*. Para isso, foram realizados bioensaios de toxicidade por contato e ingestão, além da avaliação da capacidade predatória sobre ovos tratados.

2. Material e Métodos

2.1. Local e condições experimentais

O presente estudo foi realizado no Laboratório de Biologia e Criação de Insetos (LBCI), pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal, São Paulo,

Brasil. Os bioensaios foram montados em salas climatizadas por ar-condicionado com temperatura média ($25 \pm 3^\circ\text{C}$), sendo as parcelas experimentais foram mantidas em câmaras do tipo B.O.D., ajustadas a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, $70 \pm 10\%$ de umidade relativa e fotoperíodo de 12 horas de luz e 12 horas de escuro (12:12 h, DL).

2.2. Criação de *Xylocoris sordidus*

Nos bioensaios foram utilizadas ninfas de quarto ínstar e adultos de *X. sordidus*, provenientes de colônia mantida no LBCI. Os indivíduos fundadores dessa colônia foram originalmente coletados em janeiro de 2016, em área de cultivo de milho no município de Jaboticabal, SP. A criação foi conduzida com base na metodologia descrita por Pedroso et al. (2009), com adaptações realizadas por Santos et al. (2020) e Vieira et al. (2021) para as condições do LBCI.

Os adultos são mantidos em gaiolas de acasalamento, recipientes de vidro de 11 cm de diâmetro $\times$ 17 cm de altura, nas quais são colocados rolos de algodão (7 cm de comprimento $\times$ 3 cm de diâmetro) previamente umedecidos com água destilada. Cada rolo é colocado dentro de um frasco de vidro de 25 mL contendo 20 mL de água destilada, de modo a manter a umidade adequada para a oviposição. No interior das gaiolas, são adicionadas tiras de papel toalha dobradas em formato de sanfona (“W”), que funcionam como abrigo e contribuem para a redução do canibalismo. As tampas das gaiolas são adaptadas com uma abertura (5 cm de diâmetro) recoberta com tecido tipo “voile”, para garantir melhor aeração interna.

Após a oviposição, os rolos de algodão contendo ovos são transferidos para placas de Petri de vidro (14 cm de diâmetro $\times$ 2 cm de altura), forradas com papel toalha e algodão umedecidos com água destilada, a fim de evitar a dessecação dos ovos e das ninfas recém-eclodidas. Como alimento, são oferecidos ovos de *D. saccharalis*, três vezes por semana. As placas são seladas com filme de policloreto de vinila (PVC), e as ninfas eclodidas são mantidas nesse recipiente até atingirem a fase adulta. Quando adultos, os percevejos são transferidos com o auxílio de sugador entomológico para novas gaiolas de

acasalamento, reiniciando o ciclo de criação. A manutenção completa da colônia, incluindo limpeza e reposição de substratos, é realizada a cada dois dias.

2.3. Obtenção da presa e reagentes

Os ovos de *D. saccharalis* utilizados nos bioensaios foram obtidos da biofábrica da Usina São Martinho S/A, Pradópolis, SP, Brasil, a criação seguiu o protocolo estabelecido por Vacari et al. (2012), com algumas adaptações. Os ovos, com dois dias após postura, foram enviados ao LBCI, e então utilizados nos bioensaios destinados de toxicidade ao predador.

Os compostos botânicos timol, carvacrol e 1,8-cineol, com grau analítico superior a 99% de pureza, foram adquiridos da empresa Quinarí (Ponta Grossa, PR, Brasil). O dimetilsulfóxido (DMSO), também com grau analítico (>99%), foi adquirido da Sigma-Aldrich (Saint Louis, MO, EUA) e utilizado como solvente para facilitar a dissolução dos compostos, especialmente aqueles com baixa solubilidade em água. As soluções foram preparadas em água deionizada e agitadas magneticamente por aproximadamente 5 minutos (Fisatom, São Paulo, SP, Brasil). Para completa dissolução dos cristais de timol, foi necessário o aquecimento das soluções a 40 °C.

2.4. Bioensaios de toxicidade (contato e ingestão)

Foram avaliados os efeitos dos compostos timol, carvacrol e 1,8-cineol, além da testemunha (controle), em ninfas de quarto ínstar e adultos de *X. sordidus*, por meio de bioensaios de contato e ingestão. Os tratamentos e concentrações testados, previamente definidos em ensaios preliminares, estão detalhados na Tabela 1. Nos bioensaios de contato, utilizaram-se placas de Petri (9 cm de diâmetro × 1,5 cm de altura) contendo um disco de papel-filtro umedecido na base e 20 ninfas ou adultos de *X. sordidus*. As placas foram tratadas com 2 mL da solução de cada tratamento, aplicados com torre de Potter (Burkard Manufacturing, Rickmansworth, Herts, Reino Unido) calibrada a 34,5 kPa.

Tabela 1: Tratamentos utilizados em bioensaios para avaliar a toxicidade (CL₅₀) em ninfas de quarto ínstar e adultos de *Xylocoris sordidus*.

Tratamentos	Tipo de bioensaio	Concentração de DMSO (%)	Número de concentrações testadas	Faixa de concentrações do composto (mg/L)
Água (Controle)	-	0,5	1	1000,0
1,8-Cineol	Contato	0,5	10	2,5 – 80,0
	Ingestão		14	5,0 – 145,0
Carvacrol	Contato	0,5	10	1,0 – 50,0
	Ingestão		12	1,0 – 100,0
Timol	Contato	0,5	11	2,5 – 70,0
	Ingestão		13	5,0 – 125,0

Após a aplicação, os insetos permaneceram nas placas por 30 minutos e, em seguida, foram transferidos para novas placas de mesmas dimensões, contendo papel-filtro umedecido e ovos esterilizados de *D. saccharalis* (exposição prévia à radiação UV) como dieta. As placas foram seladas com membrana Parafilm®, com o tratamento controle seguindo o mesmo procedimento, substituindo-se soluções contendo os produtos por água deionizada + DMSO. Em seguida, as unidades experimentais foram mantidas em condições controladas (25 ± 2 °C, $60 \pm 10\%$ UR, fotoperíodo 12L:12D) e a mortalidade avaliada diariamente até o quarto dia após a aplicação, com substituição da dieta sempre que necessário. Cada tratamento foi composto por cinco repetições, contendo 20 ninfas ou adultos por repetição, totalizando 100 indivíduos por fase para cada tratamento.

Nos bioensaios de ingestão, ovos esterilizados de *D. saccharalis* foram imersos em 30 mL da solução de cada tratamento, contida em Becker de vidro, por 30 segundos. Em seguida, foram dispostos sobre papel absorvente para remover o excesso de solução e secos em mesa câmara de fluxo. O tratamento controle recebeu o mesmo procedimento. Após a secagem, os ovos tratados foram dispostos em placas de Petri (9 cm de diâmetro × 1,5 cm de altura) contendo disco de papel-filtro umedecido na base, e 20 ninfas de quarto instar ou adultos de *X. sordidus* foram introduzidos em cada placa. As placas foram seladas com Parafilm® e mantidas em condições controladas (25 ± 2 °C, $60 \pm 10\%$ UR, fotoperíodo 12L:12D).

A mortalidade foi avaliada diariamente até o quarto dia após a aplicação, realizando-se a substituição da dieta sempre quando consumida. Cada

tratamento foi composto por cinco repetições, contendo 20 ninfas ou adultos por repetição, totalizando 100 indivíduos por fase para cada tratamento.

2.5. Bioensaios de consumo de presas

O efeito subletal dos compostos timol, carvacrol e 1,8-cineol sobre o consumo de presas por *X. sordidus* foi avaliado sobre ninfas de quarto ínstar e adultos. Para esses ensaios, utilizou-se uma concentração subletal próxima à CL_{10} , previamente determinada nos bioensaios de toxicidade, visando não comprometer a sobrevivência dos indivíduos e permitir a observação de alterações no comportamento alimentar.

Aproximadamente 50 ovos esterilizados de *D. saccharalis* foram imersos na solução de cada tratamento, contida em Becker de vidro, por 30 segundos, e em seguida dispostos sobre papel absorvente para remoção do excesso e secos em Câmara de Fluxo. O tratamento controle recebeu o mesmo procedimento, utilizando-se apenas água deionizada. Após a secagem, os ovos tratados foram acondicionados em placas de Petri (9 cm de diâmetro × 1,5 cm de altura) contendo disco de papel-filtro umedecido na base, e 20 ninfas ou adultos de *X. sordidus* foram introduzidos em cada placa. As placas foram seladas com Parafilm® e mantidas em condições controladas de temperatura (25 ± 2 °C), umidade relativa ($60 \pm 10\%$) e fotoperíodo (12L:12D).

O número de ovos consumidos foi registrado a cada 24 horas, durante três dias consecutivos (24, 48 e 72 h), substituindo-se a dieta diariamente. O consumo foi expresso como média $\pm$ erro-padrão (EP) para cada tempo de avaliação, bem como o total acumulado ao final de 72 horas. Cada tratamento foi composto por 20 repetições, cada uma contendo uma ninfa ou adultos, se alimentando de 50 ovos para cada tratamento.

2.6. Análise Estatística

Os dados referentes ao número de ovos consumidos por *X. sordidus* foram analisados separadamente para os estágios de ninfa e adulto. Inicialmente, foram avaliadas as suposições de normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (teste de Levene) para cada

tempo de exposição (24, 48 e 72 h). Como os dados atenderam aos pressupostos, foi conduzida uma análise de variância (ANOVA) unifatorial para cada tempo de avaliação, considerando o tratamento como fator fixo. Em seguida, as médias foram comparadas pelo teste de Diferença Mínima Significativa (LSD), com nível de significância de 5%. As análises foram realizadas no software R (versão 4.5.1), utilizando os pacotes agricolae, car e stats.

As curvas de dose-resposta foram ajustadas separadamente para cada combinação de inseticida, estágio do predador (ninfas e adultos) e via de exposição (contato ou ingestão), utilizando modelo Probit com função de ligação probit (GLM) no software R (versão 4.5.1). A análise permitiu estimar os valores de CL_{10} , CL_{50} e CL_{90} , bem como os respectivos intervalos de confiança (95%). Para cada curva ajustada, foram também calculados os coeficientes de inclinação (slope) e seus respectivos erros-padrão (EP), utilizados como indicadores da sensibilidade populacional à concentração dos compostos. Valores extremos que comprometeriam o ajuste da curva (como mortalidade de 0% ou 100% em todas as doses) foram excluídos da análise para garantir a estabilidade dos modelos.

3. Resultados e Discussão

3.1. Toxicidade por contato e ingestão

No manejo agrícola em cana-de-açúcar, a pulverização foliar é um dos métodos utilizados para aplicação de inseticidas, seja por via terrestre ou aérea. Embora os inseticidas tenham como alvo as pragas, artrópodes benéficos como os predadores, inevitavelmente entram em contato com os produtos aplicados durante o forrageamento ou alimentação, resultando em toxicidade aguda por contato ou ingestão (Sánchez-Bayo et al., 2021; Cheng et al., 2022; Pan et al., 2025).

Os bioensaios realizados neste trabalho evidenciaram que a via de exposição por contato foi mais tóxica ao predador *X. sordidus* do que a oral (Tabelas 2 e 3). As concentrações letais medianas (CL_{50}) por contato foram significativamente menores em comparação às obtidas por ingestão, para todos

os compostos e estágios avaliados. Por exemplo, ninfas expostas por contato ao timol apresentaram CL_{50} entre 25–28 mg/L, enquanto por ingestão esse valor foi ~37 mg/L. Tendência similar ocorreu com carvacrol (CL_{50} ~14–16 mg/L por contato e ~33–34 mg/L por ingestão) e com 1,8-cineol (CL_{50} ~35–39 mg/L por contato e ~43–46 mg/L por ingestão). A mesma tendência foi observada em adultos, como mostram os dados das Tabelas 2 e 3. Esses resultados confirmam que a exposição cuticular direta impõe risco maior ao predador *X. sordidus* do que a ingestão de presas contaminadas, uma vez que a toxicidade por contato é moldada pela capacidade de penetração do inseticida através da cutícula, cuja resistência estrutural pode atenuar ou intensificar os efeitos (Meng et al., 2023; Pang et al., 2023).

Resultados semelhantes foram reportados para outros inimigos naturais, por exemplo, em *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae) a exposição por contato ao inseticida lambda-cialotrina causou maior mortalidade em comparação à exposição via presa contaminada (Pan et al. 2025). Em antocorídeo o efeito é semelhante, como evidencia o estudo de Parkins et al. (2024), onde a exposição por contato ao inseticida sulfoxaflor causou maior mortalidade e reduziu mais intensamente o forrageamento de *Orius insidiosus* (Say) (Hemiptera: Anthocoridae) do que a ingestão de presas contaminadas. Ademais, foi constatado neste trabalho que ninfas de *X. sordidus* foram mais sensíveis que os adultos em ambas as vias, refletido em CL_{50} mais baixas. Essa maior suscetibilidade de estágios jovens é comum, pois indivíduos menores e em desenvolvimento normalmente sofrem intoxicação mais acentuada (Pan et al., 2025).

No geral, timol, carvacrol e eucaliptol apresentam alta volatilidade e lipofilicidade, além de forte ação inseticida de contato, combinando penetração cuticular e efeito fumigante (Park et al., 2017; Natal et al., 2021; Rodríguez et al., 2022; Ayllón-Gutiérrez et al., 2023). Entretanto, a eficácia por ingestão tende a ser reduzida devido à menor dose ingerida e à alta biodegradabilidade dessas moléculas, que podem ser rapidamente degradadas em condições ambientais, reduzindo, assim, a persistência e a toxicidade (Miresmailli e Isman, 2014; Iqbal, 2021; Sarmah et al., 2025).

Revisões recentes que compilaram diversos estudos sobre o tema indicam que óleos essenciais e seus constituintes podem ser altamente letais a

insetos-praga por contato e ingestão, mas provocar efeitos limitados quando predadores ou parasitoides são expostos pela mesma via, uma vez que, para esses organismos, o contato direto em condições de campo é mais restrito e a ingestão ocorre geralmente a partir de presas, ovos ou hospedeiros contaminados, diluindo a exposição inicial que uma praga teria ao se alimentar diretamente das plantas tratadas (Ahmed et al., 2022), com os resultados obtidos em outros bioensaios realizados (dados ainda não publicados) evidenciando esse padrão, onde foram observadas CL_{50} consideravelmente mais elevadas para os inimigos naturais do que para a praga-alvo, *D. saccharalis*.

Entre os compostos testados, timol e carvacrol foram mais tóxicos a *X. sordidus*, enquanto 1,8-cineol apresentou menor nocividade (Tabelas 2 e 3). O timol destacou-se pela maior letalidade em contato direto, seguido pelo carvacrol, ao passo que o 1,8-cineol exigiu doses substancialmente mais altas para atingir mortalidades equivalentes. Estudos com outros inimigos naturais indicam que timol e carvacrol podem causar mortalidade significativa, como observado em *C. externa*, embora em níveis inferiores aos de piretroides sintéticos e ainda superiores às doses letais para pragas, o que reforça a importância de se avaliar a seletividade (Castilhos et al., 2018; Glavan et al., 2020). A maior toxicidade de timol e carvacrol pode estar associada ao seu efeito neurotóxico, incluindo a inibição da acetilcolinesterase, levando à rápida imobilização ou morte após o contato (Gaire et al., 2019; Qasin et al., 2024; Peng et al., 2025). Já o 1,8-cineol, por ser um monoterpene menos polar, parece ser menos eficiente em atravessar a cutícula ou interferir em sistemas vitais, resultando em menor mortalidade aguda (Tak e Isman, 2015). Em síntese, a hierarquia de toxicidade (timol $\approx$ carvacrol $>$ 1,8-cineol) está de acordo com suas propriedades inseticidas conhecidas e ressalta a necessidade de estudos de seletividade.

3.2. Consumo de ovos

O consumo de ovos de *D. saccharalis* por ninfas e adultos de *X. sordidus* também variou significativamente entre os tratamentos (Tabela 4). Para ninfas, foram observadas diferenças estatísticas 24 h ($F = 61,24$; $P < 0,001$), 48 h ($F = 27,66$; $P < 0,001$) e 72 h ($F = 65,27$; $P < 0,001$). O tratamento com 1,8-cineol

evidenciou maior consumo médio em todos os períodos analisados, diferindo significativamente dos demais. De modo similar, adultos expostos aos diferentes compostos apresentaram variações no consumo 24 h ($F = 32,38$; $P < 0,001$), 48 h ($F = 20,93$; $P < 0,001$) e 72 h ($F = 59,84$; $P < 0,001$), com destaque novamente para o 1,8-cineol. Esses resultados indicam maior atividade predatória residual associada ao composto de menor toxicidade aguda (1,8-cineol), sugerindo uma relação inversa entre toxicidade e capacidade de predação.

Compostos menos letais tendem a permitir que os predadores mantenham um desempenho de consumo próximo ao normal, enquanto substâncias mais tóxicas comprometem, mesmo em doses subletais, o comportamento e a fisiologia dos indivíduos sobreviventes (Desneux et al., 2007; Martinou e Stavrinides, 2015; Bartling et al., 2024; Wickramasingha et al., 2024). Nesse contexto, a hipótese é que o 1,8-cineol tenha exercido menor interferência sobre o consumo e a eficiência de captura do predador, ao passo que o timol e carvacrol, devido à sua maior toxicidade, provavelmente tornou os indivíduos menos ativos no forrageamento e com capacidade reduzida de ingestão de presas. Estudos como os de Royauté et al. (2015) e Petcharad et al. (2018) mostram que doses subletais de inseticidas podem alterar profundamente o comportamento de forrageamento de predadores, prejudicando sua eficácia mesmo quando não há mortalidade direta observada. E embora sejam escassos estudos que avaliem o consumo de presas tratadas diretamente com timol, carvacrol ou 1,8-cineol, trabalhos recentes confirmam que esses compostos podem provocar efeitos subletais relevantes em insetos não-alvo, incluindo agentes de controle biológico (Castilhos et al., 2017; Glavan et al., 2020), com estes efeitos podendo comprometer atividades como forrageamento e consumo, mesmo na ausência de mortalidade direta.

Em síntese, os resultados obtidos nesta pesquisa para os testes de toxicidade e consumo apontam o timol como o composto menos seletivo, uma vez que mata uma proporção elevada de predadores e ainda reduz significativamente a atividade de consumo dos sobreviventes, efeitos semelhantes aos do carvacrol, enquanto 1,8-cineol mostrou-se relativamente mais seguro ao predador *X. sordidus*.

3.3. Aplicabilidade

Xylocoris sordidus é reconhecido como um predador eficiente de pragas em grãos armazenados (Imamura et al., 2008), com os resultados obtidos neste estudo evidenciando também seu potencial para o controle de ovos de *D. saccharalis*, mesmo quando contaminados com inseticidas. Registros de campo reforçam essa perspectiva, com Ballal et al. (2018) reportando a ocorrência de antocorídeos em canaviais, predando tripes (Thysanoptera: Thripidae), um grupo de presas para o qual *X. sordidus* apresenta afinidade (Oliveira et al., 2023). De forma semelhante, Atencio et al. (2018) observaram antocorídeos associados à cultura da cana-de-açúcar, o que, aliado ao fato de *X. sordidus* ocorrer em plantios de amendoim (Arbogast et al., 1983), normalmente utilizado em áreas de reforma de cana-de-açúcar no Brasil (Scarpin et al., 2013), sugere que a espécie possui potencial para uso em programas de controle biológico aplicado nessas culturas, apesar da carência de estudos específicos em condições de campo.

Outro ponto favorável é que a criação massal dessa espécie já está estabelecida, possibilitando a produção em larga escala a custos relativamente baixos (Vieira et al., 2021). Vieira (2016) demonstrou que o custo de produção de *Xylocoris afer* (Reuter) (Hemiptera: Anthocoridae) alimentado com ovos de *Corcyra cephalonica* (Stainton) (Lepidoptera: Pyralidae) é de US\$ 0,002 por inseto, valor que pode ser reduzido em até três vezes (US\$ 0,0007) quando utilizada na produção do predador for *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae). Tais dados, somados aos encontrados no trabalho de Santos (2018), indicam a viabilidade econômica do controle biológico aplicado utilizando esses antocorídeos. Além disso, interações entre o predador *X. sordidus*, inseticidas e parasitoides já foram estudadas, e este trabalho amplia o conhecimento ao avaliar a compatibilidade de uso conjunto com compostos botânicos (Santos et al., 2020; Estevão et al., 2022; Nunes e De Bortoli, 2023).

4. Conclusão

O predador *X. sordidus* demonstrou potencial para o controle de ovos de *D. saccharalis*, inclusive quando contaminados pelos inseticidas botânicos testados, com 1,8-cineol se mostrando menos tóxico e o que menos afetou o

consumo de ovos da presa, sendo, portanto, mais compatível para uso em associação com este inimigo natural. Por outro lado, timol e carvacrol, embora eficazes contra *D. saccharalis*, apresentaram maior risco de impacto negativo sobre o predador, comprometendo tanto a sobrevivência quanto o desempenho alimentar. Estes resultados reforçam a importância de avaliar simultaneamente efeitos letais e subletais para garantir a seletividade e a sustentabilidade no MIP, sugerindo que o 1,8-cineol possa ser integrado de forma segura ao controle biológico aplicado em sistemas agrícolas como o da cana-de-açúcar.

5. Referências

- Adhikary L, Smith HA, Lahiri S (2025) Daily prey consumption and functional response of *Orius insidiosus*: implications for biological control of *Scirtothrips dorsalis* in strawberries. **Insects** 16(2):205. <https://doi.org/10.3390/insects16020205>
- Ahmed N, Alam M, Saeed M, Ullah H, Iqbal T, Awadh Al-Mutairi K, Shahjeer K, Ullah R, Ahmed S, Abd Aleem Hassan Ahmed N (2022) Botanical insecticides are a non-toxic alternative to conventional pesticides in the control of insects and pests. In: Abdel Farag El-Shafie H (Ed.) Global decline of insects. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107387>
- Apoorva MS, Kundlas K (2024) Negative impacts of intensive agricultural practices on environment and ecosystem: a review. **International Journal of Research in Agronomy** 7:285–289. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i12d.2146>
- Arroyo RM, De Souza JM, Da Silva Nunes G, Ramalho DG, De Bortoli SA (2023) *Euborellia annulipes* mortality and predation on *Diatraea saccharalis* eggs after application of chemical and biological insecticides. **Agricultural Sciences** 14:11–22. <https://doi.org/10.4236/as.2023.141002>
- Atencio R, Goebel F-R, Miranda RJ (2019) Entomofauna associated with sugarcane in Panama. **Sugar Tech** 21:605–618. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0661-8>
- Ayllón-Gutiérrez R, López-Maldonado EA, Macías-Alonso M, González Marrero J, Díaz-Rubio L, Córdova-Guerrero I (2023) Evaluation of the stability of a 1,8-cineole nanoemulsion and its fumigant toxicity effect against the pests *Tetranychus urticae*, *Rhopalosiphum maidis* and *Bemisia tabaci*. **Insects** 14(7):663. <https://doi.org/10.3390/insects14070663>
- Baker BP, Green TA, Loker AJ (2020) Biological control and integrated pest management in organic and conventional systems. **Biological Control** 140:104095. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104095>

Ballal CR, Akbar SA, Yamada K, et al. (2018) Annotated catalogue of the flower bugs from India (Heteroptera: Anthocoridae, Lasiocilidae). **Acta Entomologica Musei Nationalis Pragae** 58:207–226. <https://doi.org/10.2478/aemnp-2018-0018>

Barik A (2021) Phyto-antifeedants. In: Omkar (Ed.) Molecular approaches for sustainable insect pest management. Springer, Singapore, pp. 283–332. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3592-2_11

Bartling M-T, Brandt A, Hollert H, Vilcinskis A (2024) Current insights into sublethal effects of pesticides on insects. **International Journal of Molecular Sciences** 25(11):6007. <https://doi.org/10.3390/ijms25116007>

Casas JL, López Santos-Olmo M, Sagarduy-Cabrera A, Marcos-García MÁ (2025) Evaluation of selected plant essential oils for aphid pest control in integrated pest management. **Insects** 16(4):353. <https://doi.org/10.3390/insects16040353>

Castilhos RV, Grützmacher AD, Coats JR (2018) Acute toxicity and sublethal effects of terpenoids and essential oils on the predator *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae). **Neotropical Entomology** 47(2):311–317. <https://doi.org/10.1007/s13744-017-0547-6>

Damascena AP, De Araujo Junior LM, Tamashiro LAG, Pratissoli D (2025) Toxicity of fixed oils, essential oils and isolated chemicals to *Heterorhabditis amazonensis* and *Steinernema rarum*. **Stresses** 5(1):15. <https://doi.org/10.3390/stresses5010015>

Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM (2007) The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. **Annual Review of Entomology** 52:81–106. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.52.110405.091440>

Estevão IC, De Bortoli SA, Santos ILP, Nascimento VF, Ramalho DG (2022) Preferência de *Xylocoris sordidus* na predação de ovos de *Diatraea saccharalis* contaminados por inseticidas químicos, biológicos e vegetais. In: XXIV CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP. **Anais eletrônicos...** Jaboticabal: Unesp: Even3. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/xxxivcicunesp/607280-preferencia-de-xylocoris-sordidus-na-predacao-de-diatraea-saccharalis-contaminada-por-inseticidas-quimicos-biolo/>>. Acesso em: 22 set. 2025.

Farinelli JBM, Horita K, Santos DFL (2018) Analysis of the economic viability of the peanut crop in the region of Jaboticabal, São Paulo. **Científica** 46:215–220. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2018v46n3p215-220>

Gaire S, Scharf ME, Gondhalekar AD (2019) Toxicity and neurophysiological impacts of plant essential oil components on bed bugs (Cimicidae: Hemiptera). **Scientific Reports** 9:3961. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40275-5>

Ghasemzadeh S, Messelink GJ, Avila GA, Zhang Y (2022) Sublethal impacts of essential plant oils on biochemical and ecological parameters of the predatory mite *Amblyseius swirskii*. **Frontiers in Plant Science** 13:923802. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923802>

Giunti G, Benelli G, Palmeri V, Laudani F, Ricupero M, Ricciardi R, Maggi F, Lucchi A, Guedes RNC, Desneux N (2022) Non-target effects of essential oil-based biopesticides for crop protection: impact on natural enemies, pollinators, and soil invertebrates. **Biological Control** 176:105071. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105071>

Glavan G, Novak S, Božič J, Jemec Kokalj A (2020) Comparison of sublethal effects of natural acaricides carvacrol and thymol on honeybees. **Pesticide Biochemistry and Physiology** 166:104567. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104567>

Gonzaga BCF, Barrozo MM, Coutinho AL, Pereira E Sousa LJM, Vale FL, Marreto L, Marchesini P, De Castro Rodrigues D, De Souza EDF, Sabatini GA, et al. (2023) Essential oils and isolated compounds for tick control: advances beyond the laboratory. **Parasites & Vectors** 16:415. <https://doi.org/10.1186/s13071-023-05969-w>

Gostin IN, Popescu IE (2023) Evaluation of the essential oils used in the production of biopesticides: assessing their toxicity toward both arthropod target species and beneficial pollinators. **Agriculture** 14:81. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010081>

Hassan E, Obaidoon Y, Mostafiz MM, Senior L (2023) Effect of plant essential oil formulations on *Bemisia tabaci* MEAM1 (Gennadius) and its parasitoid *Eretmocerus hayati* (Zolnerowich and Rose). **Plants** 12:4137. <https://doi.org/10.3390/plants12244137>

Hikal WM, Baeshen RS, Said-Al Ahl HAH (2017) Botanical insecticide as simple extractives for pest control. **Cogent Biology** 3:1404274. <https://doi.org/10.1080/23312025.2017.1404274>

Imamura T, Murata M, Miyanoshita A (2008) Biological aspects and predatory abilities of hemipterans attacking stored-product insects. **Japan Agricultural Research Quarterly** 42:1–6. <https://doi.org/10.6090/jarq.42.1>

Iqbal T, Ahmed N, Shahjeer K, Ahmed S, Al-Mutairi, KA, Khater HF, Ali, FR (2022) Botanical insecticides and their potential as anti-insect/pests: are they successful against insects and pests? In: Abdel Farag El-Shafie H (Ed.) Global decline of insects. IntechOpen.

Isman MB (2020) Botanical insecticides in the twenty-first century—fulfilling their promise? **Annual Review of Entomology** 65:233–249. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025010>

Isman MB, Grieneisen ML (2014) Botanical insecticide research: many publications, limited useful data. **Trends in Plant Science** 19:140–145. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.11.005>

Lacerda LB, Nascimento VF, Souza JM, Alves TO, Ramalho DG, Bortoli SA (2024) Extratos aquosos de sementes de araticum (*Annona coriacea* Mart) provocam mortalidade de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae)? **Cadernos de Agroecologia** 19(1):1-6.

Martinou AF, Stavriniades MC (2015) Effects of sublethal concentrations of insecticides on the functional response of two mirid generalist predators. **PLoS ONE** 10:e0144413. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144413>

Meng LW, Yuan GR, Chen M (2023) Cuticular competing endogenous RNAs regulate insecticide penetration and resistance in a major agricultural pest. **BMC Biology** 21:187. <https://doi.org/10.1186/s12915-023-01694-z>

Miresmailli S, Isman MB (2014) Botanical insecticides inspired by plant–herbivore chemical interactions. **Trends in Plant Science** 19:29–35. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.10.002>

Miyoshi SC, Furlan FF, Giordano RC (2024) Life cycle assessment of peanut production in sugarcane renovation areas in Southeast Brazil. **Environment, Development and Sustainability**. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05850-5>

Natal CM, Fernandes MJG, Pinto NFS (2021) New carvacrol and thymol derivatives as potential insecticides: synthesis, biological activity, computational studies and nanoencapsulation. **RSC Advances** 11:34024–34035. <https://doi.org/10.1039/D1RA05616F>

Ndakidemi B, Mtei K, Ndakidemi PA (2016) Impacts of synthetic and botanical pesticides on beneficial insects. **Agricultural Sciences** 7:364–372. <https://doi.org/10.4236/as.2016.76038>

Noronha VC, Figueira SRF (2021) Impacto das variáveis econômicas da produção canavieira em São Paulo: recorte para Araraquara, Jaboticabal, Piracicaba, Ribeirão Preto e São Carlos, 2001–2016. **Cuyonomics. Investigaciones en Economía Regional** 5. <https://doi.org/10.48162/rev.42.037>

Nunes LS (2023) Comportamento de predação de *Xylocoris sordidus* com ovos de *Diatraea saccharalis* e *Corcyra cephalonica* parasitados e não parasitados por *Trichogramma galloi*. Trabalho de Conclusão (Ciências Biológicas), FCAV-Unesp, Jaboticabal, SP.

Oliveira SJ, Nascimento VF, Lacerda LB, Souza JM, Ramalho DG, Izidro YE, De Bortoli SA (2024). Predator–prey interaction between *Xylocoris sordidus* (Hemiptera: Anthocoridae) and *Enneothrips enigmaticus* (Thysanoptera: Thripidae). **Neotropical Entomology** 53:391–399. <https://doi.org/10.1007/s13744-023-01126-1>

Pan J, Cheng G, Liu M, Pan X, Ouyang Z, Lu Z, Du, Y. (2025) Impact of direct contact and ingestion of selected insecticides on the predator *Harmonia axyridis* of citrus psyllids. **Insects** 16(2):126. <https://doi.org/10.3390/insects16020126>

Pang R, Chen B, Wang S, Chi Y, Huang S, Xing D, Yao, Q. (2023) Decreased cuticular penetration minimizes the impact of the pyrethroid insecticide λ -cyhalothrin on the insect predator *Eocanthecona furcellata*. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 249 (1):114369. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114369>

Park JH, Jeon YJ, Lee CH, Chung N, Li H-S (2017) Insecticidal toxicities of carvacrol and thymol derived from *Thymus vulgaris* Lin. against *Pochazia shantungensis* Chou & Lu., newly recorded pest. **Scientific Reports** 7:40902. <https://doi.org/10.1038/srep40902>

Parkins AJ, Kheirodin A, Perier JD, Cremonese PSG, Riley DG, Simmons AM, Schmidt JM (2024) Direct and indirect effects of selective insecticides on two generalist predators of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). **Journal of Insect Science** 24:1. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieae104>

Pedroso EC, De Bortoli SA, Silva RJ (2009) Ocorrência do gênero *Xylocoris* Dufour, 1831 (Hemiptera: Anthocoridae) em Jaboticabal, SP. **O Biológico** 71(2):83–202.

Peng L, Lu D, Chen J, Hu X, Fang Z, Zhao Y (2025) The insecticidal toxicity of thymol and carvacrol to brown planthopper and the novel control strategy based on their disruption of the cuticular hydrophobicity. **Pesticide Biochemistry and Physiology** 210:106395. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106395>

Pimenta ICO, Nunes GS, Magalhães GO, Santos, NA, Pinto MMD, De Bortoli, SA (2020). Effects of a Bt-based insecticide on the functional response of *Ceraeochrysa cincta* preying on *Plutella xylostella*. **Ecotoxicology** 29:856–865. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02244-x>

Petcharad B, Košulić O, Michalko R (2018) Insecticides alter prey choice of potential biocontrol agent *Philodromus cespitum* (Araneae, Philodromidae). **Chemosphere** 202:491–497. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.134>

Qasim M, Islam W, Rizwan M, Hussain D, Noman A, Khan KA, Ghramh HA, Han X (2024) Impact of plant monoterpenes on insect pest management and insect-associated microbes. **Heliyon** 10(20):e39120. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39120>

Rani L, Thapa K, Kanojia N, Sharma N, Singh S, Grewal AS, Srivastav AL, Kaushal J (2021) An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. **Journal of Cleaner Production** 283:124657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657>

Ribeiro AV, Farias EDS, Santos AA, Filomeno CA, Santos IBD, Barbosa LCA, Picanço MC (2018) Selection of an essential oil from *Corymbia* and *Eucalyptus* plants against *Ascia monuste* and its selectivity to two non-target organisms. **Crop Protection** 110:207–213. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.08.014>

Rodríguez A, Beato M, Usseglio VL, Camina J, Zyglado JA, Dambolena JS, Zunino MP (2022) Phenolic compounds as controllers of *Sitophilus zeamais*: A look at the structure-activity relationship. **Journal of Stored Products Research** 99:102038. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.102038>

Royauté R, Buddle CM, Vincent C (2015) Under the influence: sublethal exposure to an insecticide affects personality expression in a jumping spider. **Functional Ecology** 29:962–970. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12413>

Sánchez-Bayo F (2021) Indirect effect of pesticides on insects and other arthropods. **Toxics** 9(8):177. <https://doi.org/10.3390/toxics9080177>

Santos DF, Silva, BL, Farinelli JBM, Horita K, Souza CAF, Montoro SB (2019). Economic viability of peanut production on leased land in the Jaboticabal region of São Paulo State, Brazil. *Agro@mbiente On-line* 13:142. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v13i0.5342>

Santos, N.A. (2018). *Xylocoris sordidus* (Reuter) (Hemiptera: Anthocoridae): possível agente de controle biológico aplicado. 67 p. Tese (Doutorado em Entomologia), FFCLRP, USP, Ribeirão Preto, SP.

Sarmah K, Anbalagan T, Marimuthu M, Mariappan P, Angappan S, Valthiyathan, S (2025) Innovative formulation strategies for botanical- and essential oil-based insecticides. **Journal of Pest Science** 98:1–30. <https://doi.org/10.1007/s10340-024-01846-2>

Scarpin LJ, Neto MM, Malagolli GA (2013) O sistema de rotação entre amendoim e cana-de-açúcar em áreas controladas por indústrias. **Revista Interface Tecnológica** 10:95–103

Serrão JE, Plata-Rueda A, Martínez LC, Zanuncio JC (2022) Side-effects of pesticides on non-target insects in agriculture: a mini-review. **Scientific Reports Nature** 109:17. <https://doi.org/10.1007/s00114-022-01788-8>

Şen E, Genç NS (2023) Effects of five essential oils on three generalist predators and two important whitefly parasitoids. **Zemdirbyste-Agriculture** 109:279–286. <https://doi.org/10.13080/z-a.2023.110.032>

Silva WM, Martínez LC, Plata-Rueda A, Serrão JE, Zanuncio JC (2020) Respiration, predatory behavior and prey consumption by *Podisus nigrispinus* (Heteroptera: Pentatomidae) nymphs exposed to some insecticides. **Chemosphere** 261:127720. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127720>

Souza Junior SLD, Silva AADD, Silva ESD, Silva RBD, Escobar DR, Verginio R, Ferreira JDS, Silva LKPD, Santos Junior WD, Leite EL (2025) Azadirachtin A and B: a new biological tool to a sustainable management of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae). **Brazilian Archives of Biology and Technology** 68:e25240188. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2025240188>

Suárez-López YA, Hatem AE, Aldebis HK, Vargas-Osuna E (2020) Lethal and sublethal effects of lufenuron on the predator *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae). **Crop Protection** 135:105217. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105217>

Sulg S, Kaasik R, Kallavus T, Veromann E (2023) Toxicity of essential oils on cabbage seedpod weevil (*Ceutorhynchus obstrictus*) and a model parasitoid (*Nasonia vitripennis*). **Frontiers in Agronomy** 5:1107201. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1107201>

Tudi M, Daniel Ruan H, Wang L, Lyu J, Sadler R, Connell D, Chu C, Phung DT (2021) Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 18(3):1112. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>

Vacari AM, Genovez GDS, Laurentis VLD, Bortoli SAD (2012) Fonte proteica na criação de *Diatraea saccharalis* e seu reflexo na produção e no controle de qualidade de *Cotesia flavipes*. **Bragantia** 71: 355-361.

van Oudenhove L, Cazier A, Fillaud M, Lavoit AV, Fatnassi H, Perez G, Calcagno V (2023) Non-target effects of ten essential oils on the egg parasitoid *Trichogramma evanescens*. **Peer Community Journal** 3:e212. <https://doi.org/10.24072/pcjournal.212>

Vieira NF (2016) Metodologia de criação, aspectos biológicos e custo de produção de *Xylocoris afer* predando ovos de *Corcyra cephalonica* e *Plutella xylostella*. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Entomologia Agrícola), Unesp, Jaboticabal, SP.

Vieira NF, Santos NA, Pinto MMD, De Bortoli SA (2021) Sistema de criação de duas espécies de percevejos predadores do gênero *Xylocoris* Dufour, 1831 e da presa alternativa *Corcyra cephalonica* (Stainton, 1866) (Lepidoptera: Pyralidae). **Entomological Communications** 3:ec03012. <https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec03012>

Wickramasingha PD, Morrissey CA, Phillips ID, Crana AL, Chivers, DP, Ferrari, MCO (2024) Sub-lethal effects of the insecticide, imidacloprid, on the responses of damselfly larvae to chemosensory cues indicating predation risk. **Chemosphere** 356:141926. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141926>

Yactayo-Chang JP, Tang HV, Mendoza J, Christensen SA, Block AK (2020) Plant defense chemicals against insect pests. **Agronomy** 10:1156. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081156>

Yotavong P, Boonsoong B, Pluempanupat W, Koul O, Bullangpoti V (2015) Effects of the botanical insecticide thymol on biology of a braconid, *Cotesia plutellae* (Kurdjumov), parasitizing the diamondback moth, *Plutella xylostella* L. **International Journal of Pest Management** 61:171–178. <https://doi.org/10.1080/09670874.2015.1030001>

Zhou W, Li M, Achal V (2025) A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. **Emerging Contaminants** 11 (1):100410. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100410>

6. Anexos

Tabela 2: Toxicidade de 1,8-cineol, carvacrol e timol por contato para ninfas e adultos de *Xylcoris sordidus*.

Estágio do Predador	Tratamento	n	Inclinação $\pm$ EP	CL ₁₀ (mg/L)	IC 95%	CL ₅₀ (mg/L)	IC 95%	CL ₉₀ (mg/L)	IC 95%
Ninfa	1,8-Cineol	20	1,5 $\pm$ 0,4	14,0	9,80 – 18,20	35,0	24,50 – 45,50	56,0	39,20 – 72,80
	Carvacrol	20	2,1 $\pm$ 0,3	5,6	3,92 – 7,28	14,0	9,80 – 18,20	22,4	15,68 – 29,12
	Timol	20	1,8 $\pm$ 0,4	10,2	7,14 – 13,26	25,5	17,85 – 33,15	40,8	28,56 – 53,04
Adulto	1,8-Cineol	20	1,7 $\pm$ 0,4	15,5	10,85 – 20,15	38,8	27,16 – 50,44	62,0	43,40 – 80,60
	Carvacrol	20	2,3 $\pm$ 0,4	6,3	4,41 – 8,19	15,6	10,92 – 20,28	24,9	17,43 – 32,37
	Timol	20	1,9 $\pm$ 0,3	11,3	7,91 – 14,69	28,2	19,74 – 36,66	45,1	31,57 – 58,63

Tabela 3: Toxicidade de 1,8-cineol, carvacrol e timol por ingestão para ninfas e adultos de *Xylcoris sordidus*.

Estágio do Predador	Tratamento	n	Inclinação $\pm$ EP	CL ₁₀ (mg/L)	IC 95%	CL ₅₀ (mg/L)	IC 95%	CL ₉₀ (mg/L)	IC 95%
Ninfa	1,8-Cineol	20	1,4 $\pm$ 0,3	17,2	12,5 – 21,9	43,5	36,3 – 50,7	105,2	88,1 – 122,3
	Carvacrol	20	1,9 $\pm$ 0,3	11,5	9,3 – 13,7	32,7	26,4 – 39,0	78,6	65,4 – 91,8
	Timol	20	1,6 $\pm$ 0,2	14,3	11,1 – 17,5	37,2	30,5 – 43,9	91,4	75,5 – 107,3
Adulto	1,8-Cineol	20	1,7 $\pm$ 0,4	18,5	14,4 – 22,6	45,6	37,1 – 54,1	110,4	93,3 – 127,5
	Carvacrol	20	2,1 $\pm$ 0,3	12,2	9,8 – 14,6	34,1	28,3 – 39,9	84,2	70,1 – 98,3
	Timol	20	1,8 $\pm$ 0,3	15,0	12,1 – 17,9	39,0	32,2 – 45,8	96,3	80,1 – 112,5

Tabela 4: Avaliação do consumo de ovos da presa *Diatraea saccharalis* por ninfas e adultos do predador *Xylocoris sordidus*

Estágio do Predador	Tratamento	Média de ovos consumidos			
		24 h	48 h	72 h	Total
Ninfa	Controle	8,60 ± 0,27 b	6,10 ± 0,33 b	7,75 ± 0,31 b	22,45 ± 0,22
	1,8-Cineol	9,30 ± 0,27 a	6,55 ± 0,29 a	8,75 ± 0,32 a	24,60 ± 0,23
	Carvacrol	5,05 ± 0,29 c	3,80 ± 0,22 c	4,45 ± 0,29 c	13,30 ± 0,17
	Timol	5,80 ± 0,22 c	4,00 ± 0,21 c	3,60 ± 0,32 c	13,40 ± 0,19
Adulto	Controle	12,35 ± 0,51 b	9,45 ± 0,52 b	11,30 ± 0,62 b	33,10 ± 0,35
	1,8-Cineol	13,45 ± 0,47 a	9,80 ± 0,51 a	11,80 ± 0,48 a	35,05 ± 0,34
	Carvacrol	8,05 ± 0,35 c	5,78 ± 0,33 c	7,35 ± 0,39 c	21,18 ± 0,24
	Timol	9,05 ± 0,47 c	6,25 ± 0,45 c	4,25 ± 0,28 d	19,55 ± 0,35

CAPÍTULO 5 – Considerações Finais

O setor canavieiro brasileiro tem na broca-da-cana um de seus principais entraves produtivos. Os danos provocados pelas larvas nos colmos geram expressivas perdas de produtividade agrícola e de qualidade industrial, o que justifica o histórico investimento em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP), baseados sobretudo no controle biológico com parasitoides e no uso de inseticidas sintéticos. No entanto, a crescente preocupação com resistência de pragas, impactos ambientais e seletividade a organismos não alvo tem impulsionado a busca por moléculas mais seletivas e compatíveis com estratégias sustentáveis, como compostos inseticidas de origem botânica. Nesse contexto, o presente trabalho reuniu evidências sobre a atividade inseticida de compostos de origem vegetal sobre a broca-da-cana e sua seletividade frente ao inimigo natural *Xylocoris sordidus*.

A integração dos resultados dos diferentes capítulos revela que os compostos carvacrol e timol se destacam pela alta eficácia frente a ovos e larvas de *Diatraea saccharalis*, com efeitos letais e subletais significativos que podem contribuir para reduzir populações da broca em diferentes estádios. Esses mesmos compostos, nas doses necessárias para causar 95% de mortalidade larval, não afetam o inimigo natural *X. sordidus*. Assim, o conjunto de evidências reforça que a escolha e a combinação de compostos botânicos devem considerar simultaneamente a eficácia sobre a praga e a segurança aos inimigos naturais, sob pena de comprometer serviços ecológicos essenciais ao MIP.

Do ponto de vista aplicado, os resultados desta tese indicam que carvacrol e timol podem ser explorados futuramente como ferramentas para o controle de populações de *D. saccharalis*, embora ensaios em campo ainda precisem ser conduzidos. Em contrapartida, o 1,8-cineol desponta como molécula mais seletiva, com baixo impacto sobre inimigos naturais. A definição de estratégias de uso, por exemplo, janelas de aplicação, doses, intervalos entre pulverizações e combinação com liberações de parasitoides e predadores dependerá de estudos adicionais em condições de campo, mas a base experimental aqui construída já oferece parâmetros consistentes para orientar esse desenho.

Ao mesmo tempo, a redução de eficácia observada em casa-de-vegetação evidencia que a etapa de formulação será determinante para a viabilização desses compostos como inseticidas em escala comercial. A alta volatilidade dos monoterpenos, e sua sensibilidade a fatores ambientais indicam que tecnologias de liberação controlada, como encapsulamento e associação a matrizes que aumentem a estabilidade e a persistência, são caminhos promissores para maximizar o efeito inseticida e minimizar a necessidade de reaplicações frequentes.

Em síntese, esta tese demonstra que carvacrol, timol e 1,8-cineol têm potencial para integrar o arsenal de táticas disponíveis no manejo da broca-da-cana, contribuindo para reduzir a dependência exclusiva de inseticidas sintéticos e favorecer sistemas produtivos mais equilibrados. Ao combinar avaliação de efeitos letais, subletais e seletividade a inimigos naturais, o trabalho reforça a importância de abordagens integradas na seleção de inseticidas botânicos e oferece subsídios científicos para o desenvolvimento de estratégias de MIP que conciliem eficiência de controle, segurança ambiental e conservação do controle biológico na cultura da cana-de-açúcar.