



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

**AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE E DE EFEITOS SUBLETAIS
DA COMBINAÇÃO DE INSETICIDAS SINTÉTICOS E
BOTÂNICOS EM *Spodoptera frugiperda***

VALFRAN SILVA ANDRADE

2025



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**



VALFRAN SILVA ANDRADE

**AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE E DE EFEITOS SUBLETAIS DA COMBINAÇÃO
DE INSETICIDAS SINTÉTICOS E BOTÂNICOS EM *Spodoptera frugiperda***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.

Orientador
Prof. Dr. Leandro Bacci

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2025

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Andrade, Valfran Silva

X???x Avaliação da toxicidade e de efeitos subletais da combinação de inseticidas sintéticos e botânicos em *Spodoptera frugiperda* / Valfran Silva Andrade; orientador Leandro Bacci. – São Cristóvão, 2025.
XX f.: il.

Dissertação (Mestrado em Agricultura e Biodiversidade) – Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Bacci

1. Óleo essencial. 2. Sinergismo. 3. Lagarta-do-cartucho. 4. Bacci, Leandro 4. I. Título.

CDU: xxx.xxx.x

VALFRAN SILVA ANDRADE

**AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE E DE EFEITOS SUBLETAIS DA COMBINAÇÃO DE
INSETICIDAS SINTÉTICOS E BOTÂNICOS EM *Spodoptera frugiperda***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.

APROVADA em 14 de fevereiro de 2025.


Dra. Virginia Elena Masiulionis
(UFS)

Dra. Ana Paula Santana Lima
(UNL)

Prof. Dr. Leandro Bacci
UFS
(Orientador)

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL

A minha ancestralidade.
Dedico

AGRADECIMENTOS

A Olorun, por ter me confiado a dádiva da vida, uma oportunidade de aprendizado e crescimento. A Oxumaré, por ter aceitado me acompanhar nessa trajetória e por ser um pai tão presente e acalantar meu coração nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Sergipe (UFS) e ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade (PPGAGRI), pela oportunidade de cursar o mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC), pelos recursos financeiros para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Leandro Bacci, pelos auxílios à minha formação acadêmica desde a graduação. À Profa. Dra. Ana Paula Albano Araújo, pelos conhecimentos transmitidos e colaboração nas correções da escrita. À Dra. Virginia Elena Masiulionis, pelas sugestões para melhoria do trabalho e pelo auxílio na parte escrita.

À minha mãe, Veraldina Silva, por nunca ter medido esforços para que eu pudesse chegar até aqui. Por sempre ter priorizado meus estudos, mesmo quando tudo parecia impedir. Por ter me educado para ser humano. Tudo o que tenho e tudo o que sou, devo à minha mãe. Te amo.

À minha irmã, Ana Flávia, por sempre acreditar em mim, pela torcida e pelas palavras de carinho nos momentos difíceis. Te amo.

A todos que fazem parte do Ilê Axé Egbé Arámèfá, minha gratidão por sempre acreditarem em mim e por compreenderem minha ausência em alguns momentos de convivência e lazer. Espero que minha trajetória inspire cada um de vocês a também trilhar o caminho da educação, alcançando a universidade e se formando como graduados, mestres ou doutores. Quando um Arámèfá vence, todos nós vencemos.

Em especial, quero agradecer ao meu Babalorixá e amigo, Hilário Torres, por ter acreditado em meu sucesso, por me apoiar nos momentos difíceis, por interceder por mim e por ficar feliz com minhas conquistas. A sua participação foi fundamental ao longo de todo processo. Sou imensamente grato por tudo e por tanto.

A todos que fazem parte do Laboratório Clínica Fitossanitária, minha gratidão. Sem a ajuda de vocês, este trabalho seria apenas um título. Agradeço pelo apoio incondicional e pelo carinho que cada um sempre demonstrou por mim. Heloisa, Sandy, Camilla, Tainara, Jeovana, Mikaele, Jamile e Lucas, vocês são parte essencial dessa conquista.

Agradeço também aos amigos que não fazem mais parte do laboratório, mas que de alguma forma contribuíram com o aprendizado que me passaram: Ane, Emile, Ana Paula, Alisson, Jaciele, Geovania, Natiele, Fernanda, Vinícius e Jefferson. Em especial, agradeço a Aline, por ter sido a ponte que me conduziu ao laboratório, tornando-se peça fundamental para a realização desse trabalho, além de todo conhecimento transmitido. E a Swamy, que nunca poupou esforços para me ajudar e sempre foi solícita em transmitir conhecimentos.

Agradeço aos meus amigos de infância, os quais compartilharam comigo momentos de muita alegria, amigos que muito me ensinaram e que sempre torceram por meu sucesso. Júnior, Estela e Lucas. Em especial, agradeço a Ítalo, que foi mais que um amigo, tornou-se um verdadeiro irmão. Este trabalho é fruto das pedaladas e caminhadas rumo ao IFS, das conversas inspiradoras e das promessas de nunca desistirmos de estudar e de vencer a pobreza. Obrigado por tudo, amigo, e por me apresentar duas pessoas tão especiais: Dona Helena e Sr. Gilberto (*in memoriam*). Ser acolhido por eles como um neto durante o ensino médio foi crucial para eu chegar até aqui. Sou muito grato pela confiança, pelo acolhimento e pelo carinho que tiveram por mim.

Por fim, agradeço aos meus ancestrais, pois sou o resultado de todos que vieram antes de mim. Que eu possa honrá-los para que os que estão por vir tenham uma vida melhor do que a que eles tiveram e melhor do que a que estou tendo. “Eu sou o sonho dos meus ancestrais”.

BIOGRAFIA

Valfran Silva Andrade, filho de Valdeis Teixeira Andrade e Veraldina Santos Silva, nasceu em 18 de outubro de 1995 em Itabaiana-SE.

Em 2014, formou-se Técnico em Agroindústria pelo Instituto Federal de Sergipe (IFS) e no ano de 2017 ingressou na Universidade Federal de Sergipe (UFS) para cursar Engenharia Agrônômica. Em 2019, entrou no Laboratório Clínica Fitossanitária, onde iniciou a vida científica por meio de projetos em iniciação científica e tecnológica, PIBIC e PIBITI.

No ano de 2022, graduou-se como bacharel em Engenharia Agrônômica e em 2023, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade da UFS para o curso de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 <i>Spodoptera frugiperda</i> e a condição de praga	2
2.2 Resistência da <i>Spodoptera frugiperda</i> às estratégias de controle.....	2
2.3 Óleos essenciais e o controle de pragas.....	4
2.4 <i>Lippia sidoides</i> : potencial inseticida.....	4
2.5 Interação entre compostos botânicos e pesticidas convencionais	5
2.6 Efeitos subletais de xenobióticos a insetos.....	6
2.7 Alterações comportamentais dos insetos	6
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	8
4. Artigo 1: AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE E DE EFEITOS SUBLETAIS DA COMBINAÇÃO DE INSETICIDAS SINTÉTICOS E BOTÂNICOS EM <i>Spodoptera frugiperda</i>	19
RESUMO	19
4.1. Introdução.....	20
4.2. Material e Métodos.....	22
4.2.1. Criação dos insetos.....	22
4.2.2. Obtenção dos compostos	22
4.2.3. Bioensaios	23
4.2.3.1. Avaliação da suscetibilidade de <i>Spodoptera frugiperda</i> aos inseticidas...23	
4.2.3.2. Toxicidade	24
4.2.3.3. Tempo letal.....	25
4.2.3.4. Combinações dos inseticidas convencionais com os compostos botânicos.....	26
4.2.3.5. Preferência olfativa de fêmeas	26
4.2.3.6. Preferência olfativa de machos.....	28
4.2.3.7. Preferência alimentar e consumo foliar.....	29
4.3. Análises estatísticas	30
4.4. Resultados	32
4.4.1. Suscetibilidade da <i>Spodoptera frugiperda</i> aos inseticidas	32
4.4.2. Toxicidade	32
4.4.3. Tempo letal.....	33
4.4.4. Combinações dos inseticidas convencionais com os compostos botânicos	33
4.4.5. Preferência olfativa de fêmeas	34
4.4.6. Preferência olfativa de machos.....	34
4.4.7. Preferência alimentar e consumo foliar.....	35
4.5. Discussão	35
4.6. Conclusão	41
4.7. Referências	42
ANEXOS.....	50
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

Figura		Página
1	Mortalidade de larvas de terceiro ínstar de <i>Spodoptera frugiperda</i> após 72 horas de exposição às doses recomendadas dos inseticidas clorantraniliprole, deltametrina e metomil aplicados com torre de Potter em larvas (exposição por contato direto), em folhas de milho (exposição por contato residual + ingestão) e em larvas e folhas de milho (exposição por contato direto + contato residual + ingestão). As linhas tracejadas e contínuas dentro dos boxplots representam a média e a mediana, respectivamente. As extremidades da caixa representam os percentis 25 e 75, as linhas do erro correspondem aos percentis 10 e 90 e os círculos representam os percentis 5 e 95. A linha tracejada representa o limiar mínimo de eficiência exigido para o inseticida, segundo os critérios de registro de inseticidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA).....	50
2	Curvas de dose-mortalidade de larvas de terceiro ínstar de <i>Spodoptera frugiperda</i> após 72 horas de exposição aos inseticidas convencionais clorantraniliprole (a) e deltametrina (b) e aos inseticidas botânicos óleo essencial de <i>Lippia sidoides</i> (c) e timol (d) aplicados topicamente com o auxílio de uma microseringa. As linhas tracejadas indicam os intervalos de confiança de 95% e os círculos as médias das mortalidades observados nos experimentos.....	51
3	Curvas de sobrevivência e tempo letal (TL ₅₀) (média ± IC95%) de larvas de terceiro ínstar de <i>Spodoptera frugiperda</i> após 72 horas de exposição as DL ₉₀ dos inseticidas convencionais clorantraniliprole e deltametrina e dos inseticidas botânicos óleo essencial de <i>Lippia sidoides</i> e timol aplicados topicamente com o auxílio de uma microseringa. TL ₅₀ = tempo letal necessário para matar 50% da população. Curvas de sobrevivência seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo método de Holm-Sidak. As extremidades das caixas representam os percentis 25 e 75% e a linha dentro da caixa a mediana. Os círculos representam a média e as linhas do erro o intervalo de confiança a 95%.....	52
4	Mortalidade observada de larvas de terceiro ínstar de <i>Spodoptera frugiperda</i> após 72 h de exposição tópica aos inseticidas convencionais (clorantraniliprole e deltametrina) e aos inseticidas botânicos (óleo essencial de <i>Lippia sidoides</i> e timol) e mortalidades esperadas e observadas de suas misturas binárias nas doses correspondentes ao limite inferior (a) e superior (b) do intervalo de confiança da DL ₅₀ de cada inseticida determinadas nos bioensaios de toxicidade. Clorantraniliprole (IC _{95%} = 0,0507-0,107 µg/mg), deltametrina (IC _{95%} = 0,00466-0,0139 µg/mg), óleo essencial de <i>Lippia sidoides</i> (IC _{95%} = 2,29-3,13 µg/mg) e timol (IC _{95%} = 4,04-4,92 µg/mg). χ^2 tabelado = 3,84. χ^2 calculado > tabelado = sinergismo, χ^2 calculado < tabelado = aditismo.....	53
5	Resposta olfativa de fêmeas (a, b) e machos (c, d) de <i>Spodoptera frugiperda</i> expostos aos odores dos inseticidas convencionais (clorantraniliprole e deltametrina), inseticidas botânicos (óleo essencial de <i>Lippia sidoides</i> e timol) e suas misturas binárias. Os experimentos foram conduzidos em um olfatômetro de tubo Y (diâmetro de 2,2 cm, comprimento de 10 cm e ângulo de 75°). Para o controle dos experimentos, foram utilizadas folhas de milho e fêmeas virgens em maturidade sexual para as fêmeas e machos,	

	respectivamente. A diferença na proporção de escolha foi analisada por meio do teste de qui-quadrado ($p < 0,05$), e os histogramas em duas cores representam as misturas binárias. O tempo gasto (s) indica o período necessário para que 50% dos adultos escolhessem um dos lados do olfatômetro. As barras de erro representam os intervalos de confiança a 95% de probabilidade e os quadrados as médias observadas nos experimentos.....	54
6	Preferência (b) e consumo foliar (c, d) de larvas de terceiro ínstar de <i>Spodoptera frugiperda</i> , em arenas de 9 cm de diâmetro contendo folhas tratadas e não tratadas. (a) Legenda e esquema do bioensaio com e sem chance de escolha. (b) A diferença na proporção de escolha foi analisada com o teste de Mann-Whitney, com a mediana representada no histograma e os percentis de 40 e 60% indicados pelas linhas de erro. (c) Consumo foliar no bioensaio com possibilidade de escolha, analisado com o teste de Mann-Whitney. O histograma mostra a mediana e as linhas de erro indicam os percentis 40 e 60%. (d) Consumo foliar no bioensaio sem possibilidade de escolha, analisado com o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn's, comparando os tratamentos com o controle. As medianas estão representadas nos histogramas, com linhas de erro indicando os percentis 40 e 60%. Os histogramas em duas cores representam as misturas binárias. Os histogramas com asterisco indicam diferenças significativas na escolha das larvas.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

DDT	Diclorodifeniltricloroetano
OE	Óleo essencial
Bt	<i>Bacillus thuringiensis</i>
EC	Concentrado emulsionável
SC	Suspensão concentrada
SL	Concentrado solúvel
i.a	Ingrediente ativo
Ø	Diâmetro
♀	Fêmea
♂	Macho

RESUMO

ANDRADE, Valfran Silva. **Avaliação da toxicidade e de efeitos subletais da combinação de inseticidas sintéticos e botânicos em *Spodoptera frugiperda***. São Cristóvão: UFS, 2025. 69p. (Dissertação – Mestrado em Agricultura e Biodiversidade). *

A lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda*, conhecida pelos danos que ocasiona à produção de plantas e por sua elevada capacidade migratória, está presente em mais de 80 países. Esse inseto se destaca por sua polifagia, alta fecundidade e ciclo de vida curto, causando graves prejuízos em diversos cultivos, especialmente ao milho. O controle dessa praga tem sido dificultado devido à aquisição de resistência a diferentes grupos de inseticidas e a tecnologias transgênicas. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar se a combinação de inseticidas convencionais com compostos botânicos apresenta efeitos letais capazes de reverter a resistência da *S. frugiperda*, tornando-a novamente suscetível aos organossintéticos. Além disso, investigou-se a capacidade dessas misturas em provocar efeitos subletais, com impacto negativo no olfato dos adultos e no consumo foliar da lagarta. Os experimentos incluíram testes de suscetibilidade em torre de Potter, utilizando as doses de campo dos inseticidas Premio® (clorantraniliprole), Decis® (deltametrina) e Lannate® (metomil). Em seguida, foram estabelecidas curvas de mortalidade e sobrevivência utilizando esses inseticidas e o óleo essencial (OE) de *Lippia sidoides* e timol, seu composto majoritário. As combinações dos limites inferiores e superiores dos intervalos de confiança da dose letal para matar 50% da população (DL_{50}) de todos os compostos foram analisadas para identificar possíveis efeitos de sinergismo, antagonismo ou aditismo. Nos bioensaios subletais, avaliou-se a influência dos compostos isolados e em mistura no olfato de machos e fêmeas, bem como na preferência e consumo alimentar de larvas de terceiro ínstar. Os resultados confirmaram a resistência da *S. frugiperda* aos inseticidas clorantraniliprole e deltametrina, ambos apresentaram mortalidades inferiores a 80%. Dentre os sintéticos, a deltametrina foi o mais tóxico, com $DL_{50} = 0,00839 \mu\text{g}/\text{mg}$, e mais eficiente em reduzir o tempo de sobrevivência larval. Entre os botânicos, o óleo essencial de *L. sidoides* apresentou maior toxicidade, com $DL_{50} = 2,690 \mu\text{g}/\text{mg}$. A combinação dos tratamentos revelou sinergismo entre os inseticidas sintéticos e o óleo essencial de *L. sidoides*, e aditividade na mistura dos sintéticos com o timol. Nos efeitos subletais, constatou-se que a mistura dos organossintéticos com o óleo essencial alterou o olfato dos adultos e a alimentação das larvas. Esses resultados confirmam o potencial promissor da combinação do clorantraniliprole e da deltametrina com o OE de *L. sidoides* e timol no controle da *S. frugiperda*, demonstrando também sua capacidade de induzir efeitos subletais nesse inseto.

Palavras-chave: clorantraniliprole, deltametrina, *Lippia sidoides*, timol, resistência, mistura binária.

* Comitê Orientador: Leandro Bacci – UFS (Orientador).

ABSTRACT

Andrade, Valfran Silva. **Evaluation of toxicity and sublethal effects of the combination of synthetic and botanical insecticides on *Spodoptera frugiperda***. São Cristóvão: UFS, 2025. 69p. (Thesis – Master's in agriculture and Biodiversity). *

The fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, known for the damage it causes to plant production and for its high migratory capacity, is present in more than 80 countries. This insect stands out for its polyphagy, high fecundity and short life cycle, causing serious damage to several crops, especially corn. Control of this pest has been made difficult due to its developed resistance to different groups of insecticides and genetic modification technologies. Therefore, this study aimed to evaluate whether the combination of conventional insecticides with botanical compounds presents lethal effects capable of reversing the resistance of *S. frugiperda*, making it susceptible to organosynthetics again. Furthermore, the ability of these mixtures to cause sublethal effects was investigated, with findings indicating a negative impact on the sense of smell of adults and the leaf consumption of the caterpillar. The experiments included susceptibility tests in a Potter tower, using field doses of the insecticides Premio® (chlorantraniliprole), Decis® (deltamethrin) and Lannate® (methomyl). Mortality and survival curves were then established using these insecticides and the essential oil (EO) of *Lippia sidoides* and thymol, its major compound. For all compounds, combinations of the lower and upper limits of the confidence intervals of the lethal dose to kill 50% of the population (LD₅₀) were analyzed to identify possible synergistic, antagonistic or additive effects. In sublethal bioassays, the influence of isolated and mixed compounds on the sense of smell of males and females was evaluated, as well as on the food preference and consumption of third-instar larvae. The results confirmed the resistance of *S. frugiperda* to the insecticides chlorantraniliprole and deltamethrin, both of which presented mortality rates below 80%. Among the synthetics, deltamethrin was the most toxic, with LD₅₀ = 0.00839 µg/mg, and the most efficient in reducing larval survival time. Among the botanicals, the essential oil of *L. sidoides* showed greater toxicity, with LD₅₀ = 2.690 µg/mg. The combination of treatments revealed synergism between the synthetic insecticides and the essential oil of *L. sidoides*, and additivity in the mixture of synthetics with thymol. In sublethal effects, it was found that the mixture of organosynthetics with the essential oil altered the adults' sense of smell and the larvae's feeding. These results confirm the promising potential of the combination of chlorantraniliprole and deltamethrin with *L. sidoides* EO and thymol in the control of *S. frugiperda*, also demonstrating its ability to induce sublethal effects in this insect.

Key-words: chlorantraniliprole, deltamethrin, *Lippia sidoides*, thymol, resistance, binary mixture.

* Guidance Committee: Leandro Bacci – UFS (Advisor).

1. INTRODUÇÃO GERAL

Tendo como centro de origem as Américas, o inseto-praga *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae), conhecido como lagarta-do-cartucho, possui elevada capacidade migratória (Kenis *et al.*, 2023). Tal característica favoreceu a sua rápida dispersão, estando presente em mais de 80 países (Wyckhuys *et al.*, 2024), incluindo regiões da África (Goergen *et al.*, 2016), Europa (Babendreier *et al.*, 2022), Ásia e Oceania (Tay *et al.*, 2023). De hábito polífago, *S. frugiperda* é capaz de completar seu ciclo de vida em diferentes hospedeiros, como o arroz (*Oryza sativa*), sorgo (*Sorghum bicolor*), algodão (*Gossypium hirsutum*) e soja (*Glycine max*) (Hardke *et al.*, 2015; Montezano *et al.*, 2018; Machado *et al.*, 2020), apesar de demonstrar preferência por plantas da família Poaceae, especialmente o milho (*Zea mays*) (Barros *et al.*, 2010). A voracidade alimentar, ciclo de vida curto e alta fecundidade tornam essa espécie uma importante ameaça a cultivos agrícolas em todo o mundo (Barros *et al.*, 2010).

Atualmente, o controle de *S. frugiperda* baseia-se principalmente no uso de inseticidas sintéticos e da tecnologia de transgênicos que utiliza genes da bactéria *Bacillus thuringiensis* Berliner (Bt), para que as plantas expressem proteínas inseticidas (Burtet *et al.*, 2017). Contudo, o uso excessivo dessas ferramentas, associado à falta de práticas de manejo integrado - ex. a rotação de ingredientes ativos dos inseticidas sintéticos e a implementação de áreas de refúgio em cultivos Bt - tem acelerado o desenvolvimento de resistência da lagarta-do-cartucho (Farias *et al.*, 2014b; Sparks *et al.*, 2019). A resistência da *S. frugiperda* já foi confirmada para diversos grupos de inseticidas, incluindo piretroides, organofosforados, carbamatos, reguladores de crescimento e diamidas (Carvalho *et al.*, 2013). Além disso, há relatos de resistência às proteínas *Cry1F* e *Cry1Ab* expressas em milho Bt (Farias *et al.*, 2014a). A resistência de *S. frugiperda* compromete a eficácia das estratégias de controle, exigindo o desenvolvimento de novas alternativas para o controle dessa praga.

Nesse contexto, os óleos essenciais de plantas (OEs) têm se destacado como alternativas promissoras para o controle de *S. frugiperda* (Isman, 2020). Uma prática que vem ganhando espaço é a combinação de compostos botânicos com inseticidas convencionais, cujo objetivo é aumentar o sinergismo entre os compostos naturais e as moléculas sintéticas. Essa abordagem busca potencializar a toxicidade dos compostos, podendo ser uma estratégia eficaz para o controle de *S. frugiperda* (Fazolin *et al.*, 2016).

Estudos comprovaram que a combinação de compostos botânicos com inseticidas convencionais é eficaz no controle de insetos. No trabalho realizado por Silva *et al.* (2017), observou-se que a mistura de *Ocimum basilicum* com a deltametrina reduziu em 80% a DL₅₀ desse inseticida. Efeito semelhante foi observado usando a combinação entre o OE de *Piper aduncum* L. e os inseticidas teflubenzuron/alfacipermetrina, a qual mostrou ação sinérgica contra *S. frugiperda* (Fazolin *et al.*, 2016). Os resultados encontrados por esses autores evidenciam que a combinação dos compostos botânicos com inseticidas sintéticos pode aumentar a mortalidade de pragas, superando falhas no controle.

Dentre os OEs, o de *Lippia sidoides* (Verbanaceae) destaca-se como potencialmente promissor. Diversos estudos já demonstraram sua atividade biológica contra uma ampla variedade de organismos, incluindo fungos, bactérias e insetos (Silva *et al.*, 2010; Veras *et al.*, 2013; Araújo *et al.*, 2020; Melo *et al.*, 2022).

Diante disso, neste estudo realizamos testes com *S. frugiperda* com os objetivos de: (i) avaliar a resistência a três inseticidas sintéticos: clorantraniliprole (antranilamida), deltametrina (piretroide) e metomil (carbamato); (ii) testar os efeitos letais do OE de *L. sidoides* e do timol (composto majoritário desse OE) e de inseticidas convencionais; (iii) verificar o efeito sinérgico do OE de *L. sidoides* e do timol combinados com os inseticidas convencionais; (iv) analisar os efeitos subletais do OE de *L. sidoides* e do timol, isoladamente e em combinação com os inseticidas sintéticos, visando potencializar a eficácia dos compostos convencionais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 *Spodoptera frugiperda* e a condição de praga

Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae), conhecida como “lagarta-do-cartucho”, é descrita como praga-chave na cultura do milho. Este lepidóptero polífono tem origem nas Américas, onde frequentemente atinge surtos populacionais (Kenis *et al.*, 2023). Atualmente, essa praga está distribuída em diversas partes do mundo, como Américas, África e Europa (Wyckhuys *et al.*, 2024), o que se deve, em parte, à sua elevada capacidade de dispersão, uma vez que pode voar 100-150 km por noite (Sparks, 1979; Johnson, 1987). A lagarta-do-cartucho pode provocar danos nas plantas de milho em todas as fases de desenvolvimento (Busato *et al.*, 2002). Ao se alimentarem das folhas, as lagartas reduzem a área fotossintética, destroem o cartucho e danificam os grãos (Hellwig *et al.*, 2017); comprometendo assim o número de espigas e o peso de grãos, com perdas que podem ultrapassar 50% da produção (Chimweta *et al.*, 2020).

No cenário mundial, o Brasil destaca-se como um dos principais produtores de milho. Na safra 2023/2024, a área cultivada no país foi de 21,5 milhões de hectares sendo colhidas 123 milhões de toneladas (CONAB, 2024). No Brasil, esse cereal é utilizado, principalmente, para alimentação animal, seja como grão concentrado ou silagem (Souza *et al.*, 2018). Porém, também é uma importante matéria-prima de produtos destinados à alimentação humana, o que potencializa a sua importância econômica (Rouf Shah *et al.*, 2016).

A lagarta-do-cartucho possui metamorfose holometabólica e apresenta um ciclo de vida que dura ~34 dias em condições de laboratório, abrangendo as fases de ovo, larva, pupa e adultos (Sparks, 1979; Sharma *et al.*, 2022). A fase de ovo tem uma duração média de 3 dias, após os quais as larvas eclodem (Montezano *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2022). A fase larval se estende por cerca de 16 dias e consiste em seis instares, com durações individuais entre 2 e 4 dias (Sparks, 1979). A maior taxa de mortalidade ocorre durante os três primeiros instares larvais (Sharma *et al.*, 2022), o que sugere que o manejo da praga nesses estágios iniciais pode ser mais eficaz e econômico em condições de campo (Silva *et al.*, 2017). A fase pupal tem uma duração variável entre 8 e 13 dias. Posteriormente, os adultos emergem com uma taxa de sucesso de 97,2% (Deshmukh *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2022). O período de pré-oviposição dura, em média, 3 a 4 dias. O desenvolvimento do *S. frugiperda* pode ser influenciado por fatores ambientais como temperatura, umidade relativa e hospedeiro (Jaba *et al.*, 2020).

Na tentativa de controlar os surtos dessa lagarta e garantir a produtividade das lavouras, são utilizados o controle químico (Burtet *et al.*, 2017) e cultivos transgênicos, com a tecnologia que usa a bactéria *B. thuringiensis* (Hutchison *et al.*, 2010). Porém, esses métodos têm apresentado falhas no controle, como consequência do uso indiscriminado das moléculas organossintéticas, que têm provocado o surto de populações cada vez mais resistentes. Com isso, há a necessidade de novas moléculas inseticidas para que o controle seja alcançado (Castle *et al.*, 2009). Essa situação tornou-se mais grave com os diversos casos de resistência de populações de *S. frugiperda* a importantes inseticidas comumente usados para o seu controle, como piretroides (Diez-Rodrigues e Omoto, 2001), organofosforados (Carvalho *et al.*, 2013), e diamidas (Bolzan *et al.*, 2019). Além da resistência aos inseticidas sintéticos, há resistência de *S. frugiperda* confirmada para diferentes proteínas Bt (Farias *et al.*, 2014b). Consequentemente, há uma pressão no mercado pela descoberta de novas moléculas ou de novas estratégias, que sejam capazes de controlar essas populações resistentes (Bernardi *et al.*, 2016).

2.2 Resistência da *Spodoptera frugiperda* às estratégias de controle

O controle de insetos-praga foi fortemente transformado com o advento dos inseticidas sintéticos, que, entre as décadas de 1940 e 1950, contou com a introdução de compostos como o DDT, os organofosforados, os ciclodienos e os N-metilcarbamatos (Sparks *et al.*, 2019). A

ação desses compostos permitiu um controle eficaz, confiável e bastante acessível devido ao baixo custo desses produtos (Achilladelis *et al.*, 1987; Casida e Quistad, 1998).

No entanto, os excelentes resultados obtidos no controle de pragas levaram os produtores a utilizarem essa tecnologia de forma excessiva, visando proteger seus cultivos e aumentar a produtividade. Esse uso excessivo e indiscriminado de inseticidas expôs as populações de insetos a uma intensa pressão de seleção, favorecendo o surgimento de casos de resistência em diversas espécies de pragas (Sparks e Nauen, 2015). A resistência dos insetos pode ser definida como a capacidade de uma praga sobreviver à exposição a um inseticida que seria letal para populações suscetíveis (Tabashnik *et al.*, 2014). Esse problema, além de ser histórico, é contínuo, pois os inseticidas vêm apresentando perdas progressivas de eficácia, resultando em falhas no controle de diversas pragas e exigindo o desenvolvimento de novos mecanismos para o manejo desses insetos nas lavouras (Whalon *et al.*, 2008).

Dentre os insetos que desenvolveram mecanismos de resistência aos inseticidas, destaca-se *S. frugiperda*, principal praga da cultura do milho (Diez-Rodríguez e Omoto, 2001), cultivo que consiste em uma importante *commodity* em diversos países. Para contornar essa situação e resolver o problema da resistência aos inseticidas, a biotecnologia desenvolveu cultivares de milho para expressarem a proteína *Cry1F* da bactéria *B. thuringiensis*. As plantas com essa proteína possuem a capacidade de eliminar larvas de lepidópteros, garantindo proteção à cultura e reduzindo a necessidade das aplicações dos inseticidas (Hutchison *et al.*, 2010; Klümper e Qaim, 2014). A primeira cultivar com a tecnologia Bt foi comercializada pela primeira vez nos Estados Unidos da América (EUA) em 2003 (M. Willrich Siebert *et al.*, 2008; Storer *et al.*, 2012). Já no Brasil, a comercialização de sementes com tecnologia dos transgênicos foi disponibilizada em 2008 e utilizadas pela primeira vez na safra de 2009/2010 (Storer *et al.*, 2012).

Contudo, a rápida adesão a essa tecnologia pelos agricultores fez com que o Brasil se destacasse no cenário mundial como um dos principais usuários dessa inovação. Junto aos inseticidas sintéticos, a tecnologia Bt tornou-se uma das principais estratégias para o controle da lagarta-do-cartucho no país (Moscardini *et al.*, 2020). No entanto, assim como ocorreu com os inseticidas sintéticos, o uso de cultivares de milho transgênicos já apresenta problemas para o controle da praga (Moscardini *et al.*, 2020). O plantio intensivo de milho Bt, em extensas áreas e em mais de uma safra, tem provocado uma grande pressão de seleção sobre *S. frugiperda* (Gaughey e Whalon, 1992). Esse problema se agrava pelo uso inadequado da tecnologia, já que muitos agricultores deixam de plantar as áreas de refúgio, destinadas ao cultivo de milho convencional (Farias *et al.*, 2014b). Essas áreas são necessárias para manutenção de insetos suscetíveis nas lavouras, o que permitiria que eles acasalassem com indivíduos resistentes, contribuindo, dessa forma, para a manutenção de populações sensíveis à tecnologia (Monnerat *et al.*, 2015).

A baixa adesão às áreas de refúgio, aliada à biologia de *S. frugiperda* e à ampla extensão de lavouras com milho Bt, criou condições favoráveis para a rápida evolução da resistência a essa tecnologia (Farias *et al.*, 2014b; Bernardi *et al.*, 2015; Fatoretto *et al.*, 2017). Como resultado, já há registro de resistência da *S. frugiperda* às proteínas *Cry1F* e *Cry1Ab* expressas pelo milho Bt no Brasil (Farias *et al.*, 2014b), bem como em Porto Rico (Dangal e Huang, 2015), Argentina e EUA (Yang *et al.*, 2022), onde também foram relatados casos de resistência à proteína *Cry1F*. Como consequência direta dessa resistência, no Brasil houve necessidade de suplementação das aplicações de inseticidas sintéticos em culturas geneticamente modificadas, podendo chegar a até quatro aplicações, para eficácia do controle de *S. frugiperda* (Blanco *et al.*, 2016). No entanto, a lista de produtos eficazes tem diminuído devido à resistência já estabelecida para alguns grupos químicos, como os piretroides (Carvalho *et al.*, 2013) e, mais recentemente, as diamidas (Bolzan *et al.*, 2019).

Dessa forma, para garantir a proteção da cultura contra *S. frugiperda*, torna-se necessário o desenvolvimento e o registro de novas tecnologias de controle ou estratégias de manejo da resistência, de modo a restabelecer a suscetibilidade da praga aos métodos existentes.

Nesse sentido, a combinação de OEs com inseticidas sintéticos surge como uma alternativa promissora, pois os OEs contêm diversos constituintes bioativos (ex. terpenos) que podem atuar de formas distintas das moléculas sintéticas, dificultando a seleção de organismos resistentes (Silva *et al.*, 2017; Radhika *et al.*, 2018).

2.3 Óleos essenciais e o controle de pragas

Durante o ciclo evolutivo, as plantas desenvolveram algumas estratégias de defesa contra o ataque de insetos herbívoros, por exemplo, a síntese de metabólitos secundários com propriedades inseticidas. Tais substâncias apresentam atividade tóxica que podem causar a morte dos insetos por diferentes modos de ação ou provocar repelência (Rattan, 2010). Esses produtos apresentam uma variedade de compostos ativos, que agem em conjunto e podem ser empregados em sistemas de Manejo Integrado de Pragas (MIP) (Navarro-Silva *et al.*, 2009), podendo controlar diferentes grupos de insetos, como mastigadores (lagartas), minadores (larvas de moscas e mariposas) e sugadores (tripes, pulgões e percevejos) (Isman, 2006). Os OEs estão entre os compostos provenientes do metabolismo secundário e desempenham papel fundamental para o sistema de defesa das plantas contra fungos, bactérias, vírus e insetos herbívoros (Bakkali *et al.*, 2008).

Os OEs são constituídos por complexas misturas de substâncias orgânicas, como terpenos e compostos fenólicos, e sua composição difere amplamente entre diferentes espécies de plantas (Pavela, 2015). Nas últimas décadas, os OEs têm sido amplamente investigados para o manejo de pragas, ocupando um lugar de destaque na busca por alternativas aos pesticidas sintéticos (Siegwart *et al.*, 2015; Jyotsna *et al.*, 2024). Os OEs de plantas podem ter efeitos letais e subletais em uma variedade de insetos-praga (Melo *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2018) e podem ser usados como modelo para o desenvolvimento de novos inseticidas (Bakkali *et al.*, 2008).

Devido à complexidade dos OEs, compostos por diversos constituintes, podem haver interações entre esses componentes, resultando em efeitos sinérgicos, aditivos ou antagônicos (Fazolin *et al.*, 2016). O sinergismo potencializa os efeitos biológicos dos xenobióticos, sejam OEs ou inseticidas convencionais, permitindo a aplicação de doses menores e reduzindo os custos de manejo, além dos impactos ambientais (Oliveira *et al.*, 2023). No antagonismo, o efeito de um composto é reduzido ou suprimido na presença de outro. Já no aditismo, a interação entre dois compostos resulta em um efeito final que corresponde à soma dos efeitos individuais de cada um, sem potencialização ou inibição mútua (Secoli, 2001). Dessa forma, a combinação de OEs com inseticidas organossintéticos pode ser explorada na gestão da resistência de *S. frugiperda*, recuperando a eficácia de produtos que já apresentam falhas no controle (Radhika *et al.*, 2018).

Além dos efeitos letais, a exposição aos inseticidas botânicos e comerciais, quando aplicados em doses baixas, pode causar efeitos subletais na fisiologia, biologia e comportamento dos insetos expostos (Franca *et al.*, 2017). Desta maneira, os efeitos subletais podem ser estudados a fim de identificar a toxicidade ao inseto alvo e compreender como essas exposições irão influenciar no comportamento desses insetos (Herrero *et al.*, 2018).

2.4 *Lippia sidoides*: potencial inseticida

Lippia sidoides Cham. (Verbenaceae), planta de crescimento arbustivo - popularmente conhecida como “alecrim-pimenta” (Botelho *et al.*, 2007) e também como “alecrim-do-nordeste” ou “estrepa-cavalo” (Matos, 2002) - possui ampla distribuição nos estados do Ceará e Rio Grande do Norte (Siqueira *et al.*, 2011).

Essa planta é conhecida pela população local por suas propriedades fitoterápicas, sendo muito utilizada no tratamento de doenças infecciosas (Costa *et al.*, 2002) e queimaduras, além de possuir ação antisséptica e anti-inflamatória, geralmente empregada na forma de chás ou

macerados (Pascual *et al.*, 2001). Além do uso popular, é possível extrair o OE das folhas dessa espécie, que apresenta um cheiro característico relacionado ao seu principal constituinte, o timol, um monoterpene aromático cujos teores variam entre 34,2% e 95,1%. Essa variação pode ser explicada pela época e local de colheita, bem como pelo estágio de desenvolvimento da planta (Matos, 2002; Leal *et al.*, 2003).

Estudos científicos têm comprovado a eficácia do OE de *L. sidoides* em diversas atividades biológicas, como ação antifúngica contra *Lasiodiplodia theobromae*, causador de podridão em raízes (Melo *et al.*, 2022); ação larvicida contra o *Aedes aegypti* (Carvalho *et al.*, 2013); ação bactericida contra *Staphylococcus aureus* e *Pseudomonas aeruginosa*, ambas causadoras de infecções de pele e do trato respiratório (Silva *et al.*, 2010; Veras *et al.*, 2012); ação acaricida contra *Rhipicephalus microplus* (Penha *et al.*, 2021); e ação inseticida contra a traça-das-crucíferas (*Plutella xylostella*) e o caruncho-do-feijão (*Callosobruchus maculatus*) (Santos *et al.*, 2018; Araújo *et al.*, 2020). Essas atividades biológicas podem ser atribuídas ao composto majoritário timol, uma vez que esse composto majoritário isolado apresenta resultados semelhantes aos obtidos com o OE (Veras *et al.*, 2013). Tais propriedades destacam o potencial desse OE e de seu constituinte majoritário como agentes de controle alternativos, apresentando uma opção menos nociva ao meio ambiente devido à sua origem botânica.

2.5 Interação entre compostos botânicos e pesticidas convencionais

Alguns compostos botânicos são conhecidos por sua atividade biológica contra insetos e podem ser utilizados na forma de pós, extratos ou óleos. Além de serem geralmente fáceis de obter, esses compostos apresentam menor risco para os aplicadores e consumidores (Corrêa e Salgado, 2011). Durante as décadas de 1930 e 1940, o Brasil destacou-se como um importante produtor e exportador de produtos botânicos como rotenona, piretro e nicotina, amplamente utilizados na agricultura para o controle de pragas devido à sua maior segurança e menor impacto ambiental (Meneses, 2005).

No entanto, a falta de padronização na concentração dos constituintes ativos resultou em variações na eficiência desses compostos, o que levou à sua substituição gradual pelos inseticidas sintéticos (Isman, 2008). Esses novos produtos, com ingredientes ativos padronizados, apresentavam maior efeito residual e capacidade de controle prolongado das pragas, garantindo proteção e produtividade das lavouras (Yadav *et al.*, 2015). Apesar dessas vantagens, o uso prolongado de inseticidas sintéticos trouxe diversos problemas (Sparks e Nauen, 2015), como a redução da biodiversidade, impacto negativo sobre os inimigos naturais, contaminação ambiental e acúmulo de resíduos em alimentos, comprometendo a saúde humana (Alavanja e Bonner, 2012; Shareefdeen e Elkamel, 2024). Além disso, a aplicação indiscriminada favoreceu o desenvolvimento de resistência em várias espécies de insetos (Whalon *et al.*, 2008; Fountain e Wratten, 2013; Sparks e Nauen, 2015).

Diante desse cenário, os compostos botânicos, como os OEs de plantas, voltam a ganhar destaque (Regnault-Roger *et al.*, 2012; Isman, 2020). Embora ainda existam desafios para o registro comercial desses produtos, como a falta de padronização e o baixo efeito residual, esses compostos mostram-se promissores para reduzir os problemas causados pelos inseticidas sintéticos (Clark e Menary, 1981; Pavela e Benelli, 2016).

Estudos recentes demonstram que a combinação de compostos botânicos com inseticidas convencionais pode ser uma estratégia eficaz (Fazolin *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2017). A alta toxicidade de alguns compostos botânicos, resultante da complexidade de seus constituintes, pode apresentar elevado efeito sinérgico quando associados a inseticidas convencionais. Essa interação pode aumentar a mortalidade das pragas e permitir a redução das dosagens aplicadas (Fazolin *et al.*, 2017). Esse avanço promove um controle eficaz das pragas com menor impacto ambiental, devido à redução da dosagem de inseticidas sintéticos, que minimiza os resíduos no campo. Além disso, a alta biodegradabilidade dos OEs contribui para que esses compostos não permaneçam no ambiente por longos períodos (Regnault-Roger *et al.*,

2012). Dessa forma, a combinação entre compostos botânicos e inseticidas convencionais pode ser uma alternativa viável como estratégia para controle de pragas e de manejo da resistência. Por exemplo, segundo Fazolin *et al.* (2016), o OE de *P. aduncum* combinado aos inseticidas teflubenzuron/alfacipermetrina apresentou ação sinérgica no controle de *S. frugiperda*. De forma semelhante, a combinação do OE de *O. basilicum* com deltametrina reduziu a DL₅₀ do inseticida sintético em 80% (Silva *et al.*, 2017).

2.6 Efeitos subletais de xenobióticos a insetos

Além dos efeitos agudos provocados pelos OEs, pesquisas vêm explorando a capacidade que esses compostos possuem em provocar efeitos crônicos contra diversos insetos, o que pode gerar um impacto significativo no manejo de diferentes pragas fitófagas (Desneux *et al.*, 2007; Cordeiro *et al.*, 2010). O efeito crônico desses compostos decorre do fato de que, com o passar do tempo, os compostos se degradam no ambiente e as pragas ficam expostas por períodos mais longos a concentrações subletais do que a letais (Little, 1990).

Os inseticidas, em geral, exercem sua ação por meio da interação com um alvo bioquímico primário ou provocando lesões em sistemas metabólicos essenciais (Casida e Durkin, 2013). A toxicidade dos OEs, por exemplo, é atribuída à sua ação neurotóxica inicial, como a inibição de enzimas (ex. acetilcolinesterase), semelhante ao mecanismo de alguns inseticidas convencionais, que agem em alvos específicos do sistema nervoso dos insetos (Anderson e Coats, 2012).

Além de atuarem em alvos primários, os xenobióticos (compostos estranhos ao organismo) (Bornaz Acosta e Bornás Acosta, 2019) podem apresentar ação em sistemas secundários, o que pode resultar em impactos significativos na biologia dos insetos expostos (Müller, 2018). Essas substâncias podem induzir alterações histológicas no intestino, bem como inativar enzimas digestivas, comprometendo a capacidade de absorção de nutrientes (Jongsma e Bolter, 1997; Bigham *et al.*, 2010; Ali *et al.*, 2017). No sistema reprodutor, os xenobióticos podem provocar danos fisiológicos nos ovários, redução da espermatogênese e alterações na fertilidade, o que pode comprometer seriamente as gerações futuras dos insetos expostos (Alves *et al.*, 2014; Cruz *et al.*, 2015). Essas alterações, normalmente, não causam mortalidade do inseto, porém irão impactar as próximas gerações, por afetarem aspectos biológicos, fisiológicos, demográficos e comportamentais em indivíduos ou populações que conseguirem sobreviver (Desneux *et al.*, 2007).

2.7 Alterações comportamentais dos insetos

Comportamento pode ser entendido como qualquer ação realizada por um indivíduo em resposta a um estímulo (Hoy, 2019). Alterações comportamentais mediadas por inseticidas decorrem do modo de ação do composto ou da resposta fisiológica do organismo (Guedes *et al.*, 2016). Embora os estudos sobre os efeitos comportamentais dos pesticidas tenham aumentado recentemente, ainda há muito a ser investigado (Martinou *et al.*, 2014).

A avaliação dos efeitos subletais de compostos no comportamento dos insetos pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficazes na densidade populacional de fitófagos (Franca *et al.*, 2017). Inseticidas e bioinseticidas podem alterar a atividade de locomoção, causar repelência (Lima *et al.*, 2020; Teodoro *et al.*, 2021) ou irritabilidade, modificar a autolimpeza (Nadein e Gorb, 2022; Dantas *et al.*, 2023) e o comportamento de acasalamento (Haddi *et al.*, 2016; Tuelher *et al.*, 2017).

Nesse contexto, é possível observar que alterações nos padrões de caminhar de insetos expostos a compostos inseticidas estão relacionadas, por exemplo, às ações neurotóxicas desses xenobióticos, que podem estimular ou inibir a mobilidade dos insetos, afetando os padrões de caminhada (Plata-Rueda *et al.*, 2017). O timol, por exemplo, reduziu a velocidade e aumentou o número de meandros, resultando em desorientação de formigas expostas (Dantas *et al.*, 2023). O imidacloprido, por sua vez, intensificou a atividade locomotora de adultos do

percevejo-marrom (Haddi *et al.*, 2016), enquanto percevejos *Podisus nigrispinus* tratados com permetrina reduziram a distância percorrida (Silva *et al.*, 2020).

Além disso, pesticidas podem comprometer a percepção ambiental dos insetos, afetando sua visão ou olfato (Zeng *et al.*, 2017). Essas alterações podem prejudicar a identificação de alimentos, parceiros sexuais e locais adequados para ovoposição. Os compostos podem interagir com os quimiorreceptores localizados nas peças bucais, provocando antagonismo alimentar e reduzindo a atratividade dos alimentos (Blaney e Simmonds, 1990).

Para evitar a intoxicação por xenobióticos, insetos desenvolvem estratégias comportamentais, como a repelência, quando evitam o contato com o composto, e a irritabilidade, caracterizada pela fuga após um breve contato (Cordeiro *et al.*, 2010; Plata-Rueda *et al.*, 2017). A repelência está relacionada à percepção do inseto por meio de quimiorreceptores distribuídos pelo corpo, especialmente nos tarsos e antenas, que permitem a avaliação das condições ambientais (Patrícia *et al.*, 2017). Já a irritabilidade está relacionada a respostas neurotóxicas induzidas pela exposição (Soderlund e Bloomquist, 1989). Estudar as respostas comportamentais dos insetos aos compostos sintéticos ou botânicos é fundamental, pois esses fatores influenciam diretamente sua suscetibilidade aos tóxicos e a eficácia do manejo integrado de pragas (Guedes *et al.*, 2016).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHILLADELIS, B.; SCHWARZKOPF, A.; CINES, M. A study of innovation in the pesticide industry: Analysis of the innovation record of an industrial sector. **Research Policy**, v.16, p.175–212, 1987. DOI: 10.1016/0048-7333(87)90030-8.
- ALAVANJA, M.C.R.; BONNER, M.R. Occupational pesticide exposures and cancer risk: A Review. **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B**, v.15, p.238–263, 2012. DOI: 10.1080/10937404.2012.632358.
- ALI, A.M.; SHAURUB, E.-S.H.; ELSAYED, A.M.; MOHAMED, D.S. Antifeedant activity and some biochemical effects of garlic and lemon essential oils on *Spodoptera littoralis* (Boisduval) (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v.5, p.1476–1482, 2017.
- ALVES, T.; CRUZ, G.; WANDERLEY-TEIXEIRA, V.; TEIXEIRA, A.; OLIVEIRA, J.; CORREIA, A.; CÂMARA, C.; CUNHA, F. Effects of *Piper hispidinervum* on spermatogenesis and histochemistry of ovarioles of *Spodoptera frugiperda*. **Biotechnic & Histochemistry**, v.89, p.245–255, 2014. DOI: 10.3109/10520295.2013.837509.
- ANDERSON, J.A.; COATS, J.R. Acetylcholinesterase inhibition by nootkatone and carvacrol in arthropods. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.102, p.124–128, 2012. DOI: 10.1016/j.pestbp.2011.12.002.
- ARAÚJO, M.J.C.; CAMARA, C.A.G.; MORAES, M.M.; BORN, F.S. Insecticidal properties and chemical composition of *Piper aduncum* L., *Lippia sidoides* Cham. and *Schinus terebinthifolius* Raddi essential oils against *Plutella xylostella* L. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.92, 2020. DOI: 10.1590/0001-3765202020180895.
- BABENDREIER, D.; TOEPFER, S.; BATEMAN, M.; KENIS, M. Potential management options for the invasive moth *Spodoptera frugiperda* in Europe. **Journal of Economic Entomology**, v.115, p.1772–1782, 2022. DOI: 10.1093/jee/toac089.
- BAKKALI, F.; AVERBECK, S.; AVERBECK, D.; IDAOMAR, M. Biological effects of essential oils – A review. **Food and Chemical Toxicology**, v.46, p.446–475, 2008. DOI: 10.1016/j.fct.2007.09.106.
- BARROS, E.M.; TORRES, J.B.; RUBERSON, J.R.; OLIVEIRA, M.D. Development of *Spodoptera frugiperda* on different hosts and damage to reproductive structures in cotton. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v.137, p.237–245, 2010. DOI: 10.1111/j.1570-7458.2010.01058.x.
- BERNARDI, O.; BERNARDI, D.; HORIKOSHI, R.J.; OMOTO, C. **Manejo da resistência de insetos a plantas Bt**. Engenheiro Coelho, SP, Brasil: 2026.
- BERNARDI, O.; BERNARDI, D.; RIBEIRO, R.S.; OKUMA, D.M.; SALMERON, E.; FATORETTO, J.; MEDEIROS, F.C.L.; BURD, T.; OMOTO, C. Frequency of resistance to Vip3Aa20 toxin from *Bacillus thuringiensis* in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) populations in Brazil. **Crop Protection**, v.76, p.7–14, 2015. DOI: 10.1016/j.cropro.2015.06.006.

BIGHAM, M.; HOSSEININAVEH, V.; NABAVI, B.; TALEBI, K.; ESMAELZADEH, N. Effects of essential oil from *Teucrium polium* on some digestive enzyme activities of *Musca domestica*. **Entomological Research**, v.40, p.37–45, 2010. DOI: 10.1111/j.1748-5967.2009.00260.x.

BLANCO, C.; CHIARAVALLE, W.; DALLA-RIZZA, M.; FARIAS, J.; GARCÍA-DEGANO, M.; GASTAMINZA, G.; MOTA-SÁNCHEZ, D.; MURÚA, M.; OMOTO, C.; PIERALISI, B.; RODRÍGUEZ, J.; RODRÍGUEZ-MACIEL, J.; TERÁN-SANTOFIMIO, H.; TERÁN-VARGAS, A.; VALENCIA, S.; WILLINK, E. Current situation of pests targeted by Bt crops in Latin America. **Current Opinion in Insect Science**, v.15, p.131–138, 2016. DOI: 10.1016/j.cois.2016.04.012.

BLANEY, W.M.; SIMMONDS, M.S.J. A behavioural and electrophysiological study of the role of tarsal chemoreceptors in feeding by adults of *Spodoptera*, *Heliothis virescens* and *Helicoverpa armigera*. **Journal of Insect Physiology**, v.36, p.743–756, 1990. DOI: 10.1016/0022-1910(90)90048-K.

BOLZAN, A.; PADOVEZ, F.E.; NASCIMENTO, A.R.; KAISER, I.S.; LIRA, E.C.; AMARAL, F.S.; KANNO, R.H.; MALAQUIAS, J.B.; OMOTO, C. Selection and characterization of the inheritance of resistance of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) to chlorantraniliprole and cross-resistance to other diamide insecticides. **Pest Management Science**, v.75, p.2682–2689, 2019. DOI: 10.1002/ps.5376.

BORNAZ ACOSTA, G.; BORNÁS ACOSTA, S. Xenobióticos. **Ciencia & Desarrollo**, p.27–33, 2019. DOI: 10.33326/26176033.1999.6.108.

BOTELHO, M.A.; NOGUEIRA, N.A.P.; BASTOS, G.M.; FONSECA, S.G.C.; LEMOS, T.L.G.; MATOS, F.J.A.; MONTENEGRO, D.; HEUKELBACH, J.; RAO, V.S.; BRITO, G.A.C. Antimicrobial activity of the essential oil from *Lippia sidoides*, carvacrol and thymol against oral pathogens. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v.40, p.349–356, 2007. DOI: 10.1590/S0100-879X2007000300010.

BURTET, L.M.; BERNARDI, O.; MELO, A.A.; PES, M.P.; STRAHL, T.T.; GUEDES, J.V. Managing fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), with Bt maize and insecticides in southern Brazil. **Pest Management Science**, v.73, p.2569–2577, 2017. DOI: 10.1002/ps.4660.

BUSATO, G.R.; GRUTZMACHER, A.D.; GARCIA, M.S.; GIOLO, F.P.; MARTINS, A.F. Consumo e utilização de alimento por *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) originária de diferentes regiões do Rio Grande do Sul, das culturas do milho e do arroz Irrigado. **Neotropical Entomology**, v.31, p.525–529, 2002. DOI: 10.1590/S1519-566X2002000400003.

CARVALHO, R.A.; OMOTO, C.; FIELD, L.M.; WILLIAMSON, M.S.; BASS, C. Investigating the molecular mechanisms of organophosphate and pyrethroid resistance in the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. **PLoS ONE**, v.8, p.e62268, 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0062268.

CASIDA, J.E.; DURKIN, K.A. Neuroactive insecticides: targets, selectivity, resistance, and secondary effects. **Annual Review of Entomology**, v.58, p.99–117, 2013. DOI: 10.1146/annurev-ento-120811-153645.

CASIDA, J.E.; QUISTAD, G.B. Golden age of insecticide research: past, present, or future? **Annual Review of Entomology**, v.43, p.1–16, 1998. DOI: 10.1146/annurev.ento.43.1.1.

CASTLE, S.J.; PALUMBO, J.C.; PRABHAKER, N.; HOROWITZ, A.R.; DENHOLM, I. Ecological determinants of *Bemisia tabaci* resistance to insecticides. In: **Bemisia: Bionomics and Management of a Global Pest**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. p.423–465. DOI: 10.1007/978-90-481-2460-2_16.

CHIMWETA, M.; NYAKUDYA, I.W.; JIMU, L.; MASHINGAIDZE, A.B. Fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) damage in maize: management options for flood-recession cropping smallholder farmers. **International Journal of Pest Management**, v.66, p.142–154, 2020. DOI: 10.1080/09670874.2019.1577514.

CLARK, R.J.; MENARY, R.C. Variations in composition of peppermint oil in relation to production areas. **Economic Botany**, v.35, p.59–69, 1981. DOI: 10.1007/BF02859215.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos Safra 2023/24 5º Levantamento**. Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5478-safra-de-graos-2023-2024-esta-estimada-em-294-1-milhoes-de-toneladas>>. Acesso em: 30 jan. 2025.

CORDEIRO, E.M.G.; CORRÊA, A.S.; VENZON, M.; GUEDES, R.N.C. Insecticide survival and behavioral avoidance in the lacewings *Chrysoperla externa* and *Ceraeochrysa cubana*. **Chemosphere**, v.81, p.1352–1357, 2010. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.08.021.

CORRÊA, J.C.R.; SALGADO, H.R.N. Atividade inseticida das plantas e aplicações: revisão. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.13, p.500–506, 2011. DOI: 10.1590/S1516-05722011000400016.

COSTA, S.M.O.; LEMOS, T.L.G.; PESSOA, O.D.L.; ASSUNÇÃO, J.C.C.; BRAZ-FILHO, R. Constituintes químicos de *Lippia sidoides* (Cham.) Verbenaceae. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v.12, p.66–67, 2002. DOI: 10.1590/S0102-695X2002000300032.

CRUZ, G.S.; TEIXEIRA, V.W.; OLIVEIRA, J.V.; TEIXEIRA, A.A.C.; ARAÚJO, A.C.; ALVES, T.J.S.; CUNHA, F.M.; BREDA, M.O. Histological and histochemical changes by clove essential oil upon the gonads of *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **International Journal of Morphology**, v.33, p.1393–1400, 2015. DOI: 10.4067/S0717-95022015000400034.

DANGAL, V.; HUANG, F. Fitness costs of *Cry1F* resistance in two populations of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith), collected from Puerto Rico and Florida. **Journal of Invertebrate Pathology**, v.127, p.81–86, 2015. DOI: 10.1016/j.jip.2015.03.004.

DANTAS, J.O.; CAVALCANTI, S.C.H.; ARAÚJO, A.P.A.; SILVA, J.E.; BRITO, T.B.; ANDRADE, V.S.; PINHEIRO, H.S.S.; TAVARES, S.R.S.A.; BLANK, A.F.; BACCI, L. Formicidal potential of thymol Derivatives: adverse effects on the survival and behavior of *Acromyrmex balzani*. **Agriculture**, v.13, p.1410, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13071410.

DESHMUKH, S.S.; CHORMULE, A.; SHEJAWAL, N.; KALLESHWARASWAMY, C.; ASOKAN, R.; SWAMY, H.M. First report of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera, Noctuidae) on sugarcane and other crops from Maharashtra, India. **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v.7, p.114–117, 2019.

DESNEUX, N.; DECOURTYE, A.; DELPUECH, J.-M. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. **Annual Review of Entomology**, v.52, p.81–106, 2007. DOI: 10.1146/annurev.ento.52.110405.091440.

DIEZ-RODRIGUES, G.L.; OMOTO, C. Herança da resistência de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) a lambda-cialotrina. **Neotropical Entomology**, v.30, p.311–316, 2001. DOI: 10.1590/S1519-566X2001000200016.

FARIAS, J.R.; ANDOW, D.A.; HORIKOSHI, R.J.; SORGATTO, R.J.; FRESIA, P.; SANTOS, A.C.; OMOTO, C. Field-evolved resistance to *Cry1F* maize by *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **Crop Protection**, v.64, p.150–158, 2014a. DOI: 10.1016/j.cropro.2014.06.019.

FARIAS, J.R.; HORIKOSHI, R.J.; SANTOS, A.C.; OMOTO, C. Geographical and temporal variability in susceptibility to *Cry1F* toxin from *Bacillus thuringiensis* in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) populations in Brazil. **Journal of Economic Entomology**, v.107, p.2182–2189, 2014b. DOI: 10.1603/EC14190.

FATORETTO, J.C.; MICHEL, A.P.; SILVA FILHO, M.C.; SILVA, N. Adaptive potential of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) Limits Bt trait durability in Brazil. **Journal of Integrated Pest Management**, v.8, 2017. DOI: 10.1093/jipm/pmx011.

FAZOLIN, M.; ESTRELA, J.L.V.; MEDEIROS, A.F.M.; SILVA, I.M.; GOMES, L.P.; SILVA, M.S.F. Synergistic potential of dillapiole-rich essential oil with synthetic pyrethroid insecticides against fall armyworm. **Ciência Rural**, v.46, p.382–388, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20141500.

FAZOLIN, M.; ESTRELA, J.L.V.; MONTEIRO, A.F.M.; SILVA, I.M.; GOMES, L.P. Sinérgico alternativo para inseticidas inibidores de acetilcolinesterase. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, v.11, p.232, 2017. DOI: 10.18227/1982-8470ragro.v11i3.3995.

FOUNTAIN, E.D.; WRATTEN, S.D. Conservation biological control and biopesticides in agricultural. In: **Encyclopedia of Ecology**. [s.l.] Elsevier, 2013. p.377–381. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.00539-X.

FRANCA, S.M.; BREDA, M.O.; BARBOSA, D.R.S.; ARAUJO, A.M.N.; GUEDES, C.A. The sublethal effects of insecticides in insects. In: **Biological Control of Pest and Vector Insects**. [s.l.] InTech, 2017. DOI: 10.5772/66461.

GAUGHEY, W.H.; WHALON, M.E. Managing insect resistance to *Bacillus thuringiensis* toxins. **Science (New York, N.Y.)**, v.258, p.1451–5, 1992. DOI: 10.1126/science.258.5087.1451.

GOERGEN, G.; KUMAR, P.L.; SANKUNG, S.B.; TOGOLA, A.; TAMÒ, M. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in west and central Africa. **PLOS ONE**, v.11, p.1–9, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0165632.

GUEDES, R.N.C.; SMAGGHE, G.; STARK, J.D.; DESNEUX, N. Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs. **Annual Review of Entomology**, v.61, p.43–62, 2016. DOI: 10.1146/annurev-ento-010715-023646.

HADDI, K.; MENDES, M. V.; BARCELLOS, M.S.; LINO-NETO, J.; FREITAS, H.L.; GUEDES, R.N.C.; OLIVEIRA, E.E. Sexual success after stress? imidacloprid-induced hormesis in males of the neotropical stink Bug *Euschistus heros*. **PLOS ONE**, v.11, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0156616.

HARDKE, J.T.; LORENZ, G.M.; LEONARD, B.R. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) ecology in southeastern cotton. **Journal of Integrated Pest Management**, v.6, p.10–10, 2015. DOI: 10.1093/jipm/pmv009.

HELLWIG, L.; GRUTZMACHER, A.D.; SANTOS, P.M.; TRECHA, C.O.; MEDINA, L.B.; BERTO, R.M.; AFONSO DA ROSA, A.P.S. Efeito do aumento da densidade de larvas de *Spodoptera frugiperda* em milho convencional em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.16, p.337, 2017. DOI: 10.18512/1980-6477/rbms.v16n3p337-350.

HERRERO, M.I.; DAMI, L.C.; FOGLIATA, S. V.; CASMUZ, A.S.; GÓMEZ, D.R.S.; GASTAMINZA, G.A.; MURÚA, M.G. Fertility life table, population parameters and biotic potential of *Helicoverpa gelotopoeon* (Dyar) (Lepidoptera: Noctuidae). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.90, p.3831–3838, 2018. DOI: 10.1590/0001-3765201820180318.

HOY, M.A. Molecular genetics of insect behavior. In: **Insect Molecular Genetics**. [s.l.] Elsevier, 2019. p.413–461. DOI: 10.1016/B978-0-12-815230-0.00011-X.

HUTCHISON, W.D.; BURKNESS, E.C.; MITCHELL, P.D.; MOON, R.D.; LESLIE, T.W.; FLEISCHER, S.J.; ABRAHAMSON, M.; HAMILTON, K.L.; STEFFEY, K.L.; GRAY, M.E.; HELLMICH, R.L.; KASTER, L. V.; HUNT, T.E.; WRIGHT, R.J.; PECINOVSKY, K.; RABAEY, T.L.; FLOOD, B.R.; RAUN, E.S. Areawide suppression of european corn borer with Bt maize reaps savings to non-Bt maize growers. **Science**, v.330, p.222–225, 2010. DOI: 10.1126/science.1190242.

ISMAN, M.B. Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. **Annual Review of Entomology**, v.51, p.45–66, 2006. DOI: 10.1146/annurev.ento.51.110104.151146.

ISMAN, M.B. Botanical insecticides: for richer, for poorer. **Pest Management Science**, v.64, p.8–11, 2008. DOI: 10.1002/ps.1470.

ISMAN, M.B. Botanical insecticides in the twenty-first century—fulfilling their promise? **Annual Review of Entomology**, v.65, p.233–249, 2020. DOI: 10.1146/annurev-ento-011019-025010.

JABA, J.; SATHISH, K.; MISHRA, S.P. Biology of fall army worm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) on artificial diets. **Indian Journal of Entomology**, v.82, p.543, 2020. DOI: 10.5958/0974-8172.2020.00135.2.

JOHNSON, S.J. Migration and the life history strategy of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in the Western Hemisphere. **International Journal of Tropical Insect Science**, v.8, p.543–549, 1987. DOI: 10.1017/S1742758400022591.

- JONGSMA, M.A.; BOLTER, C. The adaptation of insects to plant protease inhibitors. **Journal of Insect Physiology**, v.43, p.885–895, 1997. DOI: 10.1016/S0022-1910(97)00040-1.
- KENIS, M.; BENELLI, G.; BIONDI, A.; CALATAYUD, P.-A.; DAY, R.; DESNEUX, N.; HARRISON, R.D.; KRITICOS, D.; RWOMUSHANA, I.; BERG, J. VAN DEN; VERHEGGEN, F.; ZHANG, Y.-J.; AGBOYI, L.K.; AHISSOU, R.B.; BA, M.N.; WU, K. Invasiveness, biology, ecology, and management of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. **Entomologia Generalis**, v.43, p.187–241, 2023. DOI: 10.1127/entomologia/2022/1659.
- KLÜMPER, W.; QAIM, M. A Meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. **PLoS ONE**, v.9, p.e111629, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0111629.
- LEAL, L.K.A.M.; OLIVEIRA, V.M.; ARARUNA, S.M.; MIRANDA, M.C.C.; OLIVEIRA, F.M.A. Análise de timol por CLAE na tintura de *Lippia sidoides* Cham. (alecrim-pimenta) produzida em diferentes estágios de desenvolvimento da planta. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v.13, p.9–11, 2003. DOI: 10.1590/S0102-695X2003000300004.
- LIMA, A.P.S.; SANTANA, E.D.R.; SANTOS, A.C.C.; SILVA, J.E.; RIBEIRO, G.T.; PINHEIRO, A.M.; SANTOS, Í.T.B.F.; BLANK, A.F.; ARAÚJO, A.P.A.; BACCI, L. Insecticide activity of botanical compounds against *Spodoptera frugiperda* and selectivity to the predatory bug *Podisus nigrispinus*. **Crop Protection**, v.136, p.105230, 2020. DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105230.
- LITTLE, E.E. Behavioral toxicology: Stimulating challenges for a growing discipline. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v.9, p.1–2, 1990. DOI: 10.1002/etc.5620090101.
- MACHADO, E.P.; RODRIGUES JUNIOR, G.L.S.; FÜHR, F.M.; ZAGO, S.L.; MARQUES, L.H.; SANTOS, A.C.; NOWATZKI, T.; DAHMER, M.L.; OMOTO, C.; BERNARDI, O. Cross-crop resistance of *Spodoptera frugiperda* selected on Bt maize to genetically-modified soybean expressing *Cry1Ac* and *Cry1F* proteins in Brazil. **Scientific Reports**, v.10, p.10080, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-67339-1.
- MARTINOU, A.F.; SERAPHIDES, N.; STAVRINIDES, M.C. Lethal and behavioral effects of pesticides on the insect predator *Macrolophus pygmaeus*. **Chemosphere**, v.96, p.167–173, 2014. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.024.
- MATOS, F.J.A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. 1.ed. 2002. v.1 512–512p.
- MELO, J.O.; BLANK, A.F.; NUNES, R.S.; ALVES, P.B.; ARRIGONI-BLANK, M.F.; GAGLIARDI, P.R.; NASCIMENTO-JÚNIOR, A.F.; SAMPAIO, T.S.; LIMA, A.D.; NIZIO, D.A.C. Essential oils of *Lippia gracilis* and *Lippia sidoides* chemotypes and their major compounds carvacrol and thymol: nanoemulsions and antifungal activity against *Lasiodiplodia theobromae*. **Research, Society and Development**, v.11, p.e36511326715, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i3.26715.
- MELO, J.P.R.; CAMARA, C.A.G.; LIMA, G.S.; MORAES, M.M.; ALVES, P.B. Acaricidal properties of the essential oil from *Aristolochia trilobata* and its major constituents against the two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*). **Canadian Journal of Plant Science**, v.98, p.1342–1348, 2018. DOI: 10.1139/cjps-2018-0163.

MENESES, E.L.A. **Inseticidas Botânicos: seus princípios ativos, modo de ação e uso agrícola**. Soropédica, Rio de Janeiro: Embrapa Agrobiologia, 2005. 58pp.

MONNERAT, R.; MARTINS, E.; MACEDO, C.; QUEIROZ, P.; PRAÇA, L.; SOARES, C.M.; MOREIRA, H.; GRISI, I.; SILVA, J.; SOBERON, M.; BRAVO, A. Evidence of field-evolved resistance of *Spodoptera frugiperda* to Bt corn expressing *Cry1F* in Brazil that is still sensitive to modified Bt toxins. **PLOS ONE**, v.10, p.e0119544, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0119544.

MONTEZANO, D.G.; SPECHT, A.; SOSA-GÓMEZ, D.R.; ROQUE-SPECHT, V.F.; PAULA-MORAES, S.V.; PETERSON, J.A.; HUNT, T.E. Developmental parameters of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) immature stages under controlled and standardized conditions. **Journal of Agricultural Science**, v.11, p.76, 2019. DOI: 10.5539/jas.v11n8p76.

MONTEZANO, D.G.; SPECHT, A.; SOSA-GÓMEZ, D.R.; ROQUE-SPECHT, V.F.; SOUSA-SILVA, J.C.; PAULA-MORAES, S.V.; PETERSON, J.A.; HUNT, T.E. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. **African Entomology**, v.26, p.286–300, 2018. DOI: 10.4001/003.026.0286.

MOSCARDINI, V.F.; MARQUES, L.H.; SANTOS, A.C.; ROSSETTO, J.; SILVA, O.A.B.N.; RAMPAZZO, P.E.; CASTRO, B.A. Efficacy of *Bacillus thuringiensis* (Bt) maize expressing *Cry1F*, *Cry1A*, *Cry2Ab2* and *Vip3Aa20* proteins to manage the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **Crop Protection**, v.137, p.105269, 2020. DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105269.

MÜLLER, C. Impacts of sublethal insecticide exposure on insects — Facts and knowledge gaps. **Basic and Applied Ecology**, v.30, p.1–10, 2018. DOI: 10.1016/j.baae.2018.05.001.

NADEIN, K.; GORB, S. Smart joints: auto-cleaning mechanism in the legs of beetles. **Communications Biology**, v.5, p.1030, 2022. DOI: 10.1038/s42003-022-03924-6.

NAVARRO-SILVA, M.A.; MARQUES, F.A.; DUQUE L, J.E. Review of semiochemicals that mediate the oviposition of mosquitoes: a possible sustainable tool for the control and monitoring of Culicidae. **Revista Brasileira de Entomologia**, v.53, p.1–6, 2009. DOI: 10.1590/S0085-56262009000100002.

OLIVEIRA, A.P.; SANTOS, A.A.; SANTANA, A.S.; LIMA, A.P.S.; MELO, C.R.; SANTANA, E.D.R.; SAMPAIO, T.S.; BLANK, A.F.; ARAÚJO, A.P.A.; CRISTALDO, P.F.; BACCI, L. Essential oil of *Lippia sidoides* and its major compound thymol: Toxicity and walking response of populations of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Crop Protection**, v.112, p.33–38, 2018. DOI: 10.1016/j.cropro.2018.05.011.

OLIVEIRA, R.V.; SOUSA, A.H.; TAMWING, G.S.; SILVA, M.C.; SILVA, M.C.; MOTA, B.B. Óleo essencial de *Piper aduncum* L.: toxicidade e sinergismo como estratégias de controle de *Sitophilus zeamais* Motschulsky, 1855 (Coleoptera: Curculionidae): uma revisão de literatura. **Scientia Naturalis**, v.5, 2023. DOI: 10.29327/269504.5.2-30.

PASCUAL, M.E.; SLOWING, K.; CARRETERO, E.; SÁNCHEZ MATA, D.; VILLAR, A. *Lippia*: traditional uses, chemistry and pharmacology: a review. **Journal of Ethnopharmacology**, v.76, p.201–214, 2001. DOI: 10.1016/S0378-8741(01)00234-3.

PATRÍCIA, C.H.G.; CLEUSA, A.M.B.K.; VIDICA, B.; ISLEDI, W.S.; ILAINE, T.S.G.; JÉSSYCA, B.C.; JOSÉ, A.G.S. Effects of *Schinus terebinthifolius* extracts on the control of *Sitophilus* species in stored wheat grains. **African Journal of Agricultural Research**, v.12, p.3556–3561, 2017. DOI: 10.5897/AJAR2017.12621.

PAVELA, R. Essential oils for the development of eco-friendly mosquito larvicides: A review. **Industrial Crops and Products**, v.76, p.174–187, 2015. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.06.050.

PAVELA, R.; BENELLI, G. Essential oils as ecofriendly biopesticides? challenges and constraints. **Trends in Plant Science**, v.21, p.1000–1007, 2016. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.10.005.

PENHA, T.; COSTA, A.C.C.; LIMA, A.S.; CAMARGO-MATHIAS, M.I.; BLANK, A.F.; ABREU-SILVA, A.L.; COSTA-JÚNIOR, L.M. Effects of acaricidal essential oils from *Lippia sidoides* and *Lippia gracilis* and their main components on vitellogenesis in *Rhipicephalus microplus* (Canestrini, 1888) (Acari: Ixodidae). **Veterinary Parasitology**, v.299, p.109584, 2021. DOI: 10.1016/j.vetpar.2021.109584.

PLATA-RUEDA, A.; MARTÍNEZ, L.C.; SANTOS, M.H.; FERNANDES, F.L.; WILCKEN, C.F.; SOARES, M.A.; SERRÃO, J.E.; ZANUNCIO, J.C. Insecticidal activity of garlic essential oil and their constituents against the mealworm beetle, *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae). **Scientific Reports**, v.7, p.46406, 2017. DOI: 10.1038/srep46406.

RADHIKA, S.; SAHAYARAJ, K.; SENTHIL-NATHAN, S.; HUNTER, W.B. Individual and synergist activities of monocrotophos with neem based pesticide, Vijayneem against *Spodoptera litura* Fab. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v.101, p.54–68, 2018. DOI: 10.1016/j.pmpp.2017.05.004.

RATTAN, R.S. Mechanism of action of insecticidal secondary metabolites of plant origin. **Crop Protection**, v.29, p.913–920, 2010. DOI: 10.1016/j.cropro.2010.05.008.

REGNAULT-ROGER, C.; VINCENT, C.; ARNASON, J.T. Essential oils in insect control: Low-risk products in a high-stakes World. **Annual Review of Entomology**, v.57, p.405–424, 2012. DOI: 10.1146/annurev-ento-120710-100554.

SANTOS, V.S.; SILVA, P.H.; PÁDUA, L.E. Bioatividade do óleo essencial de *Lippia sidoides* Cham. (alecrim-pimenta) sobre *Callosobruchus maculatus* (Fabr.) (Coleoptera: Crysomelidae). **EntomoBrasilis**, v.11, p.113–117, 2018. DOI: 10.12741/ebrasilis.v11i2.737.

SECOLI, S.R. Interações medicamentosas: fundamentos para a pratica clínica da enfermagem. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, v.35, p.28–34, 2001. DOI: 10.1590/S0080-62342001000100005.

SHAH, T.R.; PRASAD, K.; KUMAR, P. Maize - A potential source of human nutrition and health: A review. **Cogent Food & Agriculture**, v.2, 2016. DOI: 10.1080/23311932.2016.1166995.

SHAREEFDEEN, Z.; ELKAMEL, A. Toxic and environmental effects of neonicotinoid based insecticides. **Applied Sciences**, v.14, p.3310, 2024. DOI: 10.3390/app14083310.

- SHARMA, S.; TIWARI, S.; THAPA, R.B.; NEUPANE, S.; REDDY, G.V.; POKHREL, S.; MUNIAPPAN, R. Life cycle and morphometrics of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: noctuidae) on maize crop. **SAARC Journal of Agriculture**, v.20, p.77–86, 2022. DOI: 10.3329/sja.v20i1.60532.
- SIEBERT, M.W.; BABOCK, J.M.; NOLTING, S.P.; SANTOS, A.C.; ADAMCZYK, J. J.; NEESE, P.A.; NEESE, P.; KING, J.E.; JENKINS, J.N.; MCCARTY, J.; LORENZ, G.M.; FROMME, D.D.; LASSITER, R.B. Efficacy of *Cry1F* insecticidal protein in maize and cotton for control of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). **Florida Entomologist**, 2008. DOI: 10.1653/0015-4040-91.4.555.
- SIEGWART, M.; GRAILLOT, B.; LOPEZ, C.B.; BESSE, S.; BARDIN, M.; NICOT, P.C.; LOPEZ-FERBER, M. Resistance to bio-insecticides or how to enhance their sustainability: a review. **Frontiers in Plant Science**, v.6, 2015. DOI: 10.3389/fpls.2015.00381.
- SILVA, S.M.; CUNHA, J.P.A.R.; CARVALHO, S.M.; ZANDONADI, C.H.S.; MARTINS, R.C.; CHANG, R. *Ocimum basilicum* essential oil combined with deltamethrin to improve the management of *Spodoptera frugiperda*. **Ciência e Agrotecnologia**, v.41, p.665–675, 2017. DOI: 10.1590/1413-70542017416016317.
- SILVA, V.A.; FREITAS, A.F.R.; PEREIRA, M.S.V.; SIQUEIRA JÚNIOR, J.P.; PEREIRA, A.V.; HIGINO, J.S. Avaliação in vitro da atividade antimicrobiana do extrato da *Lippia sidoides* Cham. sobre isolados biológicos de *Staphylococcus aureus*. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v.12, p.452–455, 2010. DOI: 10.1590/S1516-05722010000400008.
- SILVA, W.M.; MARTÍNEZ, L.C.; PLATA-RUEDA, A.; SERRÃO, J.E.; ZANUNCIO, J.C. Respiration, predatory behavior and prey consumption by *Podisus nigrispinus* (Heteroptera: Pentatomidae) nymphs exposed to some insecticides. **Chemosphere**, v.261, p.127720, 2020. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127720.
- SIQUEIRA, V.M.; CONTI, R.; ARAÚJO, J.M.; SOUZA-MOTTA, C.M. Endophytic fungi from the medicinal plant *Lippia sidoides* Cham. and their antimicrobial activity. **Symbiosis**, v.53, p.89–95, 2011. DOI: 10.1007/s13199-011-0113-7.
- SODERLUND, D.M.; BLOOMQUIST, J.R. Neurotoxic actions of pyrethroid insecticides. **Annual Review of Entomology**, v.34, p.77–96, 1989. DOI: 10.1146/annurev.en.34.010189.000453.
- SOUZA, A.E.; REIS, J.G.M.; RAYMUNDO, J.C.; PINTO, R.S. Estudo da produção de milho no Brasil. **South American Development Society Journal**, v.4, p.182, 2018. DOI: 10.24325/issn.2446-5763.v4i11p182-194.
- SPARKS, A.N. A review of the biology of the fall armyworm. **The Florida Entomologist**, v.62, p.82, 1979. DOI: 10.2307/3494083.
- SPARKS, T.C.; NAUEN, R. IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.121, p.122–128, 2015. DOI: 10.1016/j.pestbp.2014.11.014.
- SPARKS, T.C.; WESSELS, F.J.; LORSBACH, B.A.; NUGENT, B.M.; WATSON, G.B. The new age of insecticide discovery-the crop protection industry and the impact of natural

products. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.161, p.12–22, 2019. DOI: 10.1016/j.pestbp.2019.09.002.

STORER, N.P.; KUBISZAK, M.E.; ED KING, J.; THOMPSON, G.D.; SANTOS, A.C. Status of resistance to Bt maize in *Spodoptera frugiperda*: Lessons from Puerto Rico. **Journal of Invertebrate Pathology**, v.110, p.294–300, 2012. DOI: 10.1016/j.jip.2012.04.007.

TABASHNIK, B.E.; MOTA-SANCHEZ, D.; WHALON, M.E.; HOLLINGWORTH, R.M.; CARRIÈRE, Y. Defining terms for proactive management of resistance to Bt crops and pesticides. **Journal of Economic Entomology**, v.107, p.496–507, 2014. DOI: 10.1603/EC13458.

TAY, W.T.; KUNIATA, L.; JAMES, W.; WALSH, T. Confirmation of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Papua New Guinea by molecular diagnostics of mitochondrial DNA COI gene. **BioInvasions Records**, v.12, p.103–116, 2023. DOI: 10.3391/bir.2023.12.1.09.

TEODORO, A.V.; PINTO-ZEVALLOS, D.M.; MENEZES, M.S.; ARRIGONI-BLANK, M.F.; OLIVEIRA, E.M.C.; SAMPAIO, T.S.; VASCONCELOS, J.F.; BLANK, A.F. Toxicity and repellency of the essential oil from *Lippia gracilis* to the coconut mite *Aceria guerreronis* (Acari: Eriophyidae). **International Journal of Acarology**, v.47, p.414–417, 2021. DOI: 10.1080/01647954.2021.1922497.

TUELHER, E.S.; SILVA, É.H.; FREITAS, H.L.; NAMORATO, F.A.; SERRÃO, J.E.; GUEDES, R.N.C.; OLIVEIRA, E.E. Chlorantraniliprole-mediated toxicity and changes in sexual fitness of the Neotropical brown stink bug *Euschistus heros*. **Journal of Pest Science**, v.90, p.397–405, 2017. DOI: 10.1007/s10340-016-0777-0.

VERAS, H.N.H.; ARARUNA, M.K.A.; COSTA, J.G.M.; COUTINHO, H.D.M.; KERNTOPF, M.R.; BOTELHO, M.A.; MENEZES, I.R.A. Topical Antiinflammatory Activity of Essential Oil of *Lippia sidoides* Cham: Possible mechanism of action. **Phytotherapy Research**, v.27, p.179–185, 2013. DOI: 10.1002/ptr.4695.

VERAS, H.N.H.; RODRIGUES, F.F.G.; COLARES, A. V.; MENEZES, I.R.A.; COUTINHO, H.D.M.; BOTELHO, M.A.; COSTA, J.G.M. Synergistic antibiotic activity of volatile compounds from the essential oil of *Lippia sidoides* and thymol. **Fitoterapia**, v.83, p.508–512, 2012. DOI: 10.1016/j.fitote.2011.12.024.

WHALON, M.E.; MOTA-SANCHEZ, D.; HOLLINGWORTH, R.M. Analysis of global pesticide resistance in arthropods. In: **Global pesticide resistance in arthropods**. UK: CABI, 2008. p.5–31. DOI: 10.1079/9781845933531.0005.

WYCKHUYS, K.A.G.; AKUTSE, K.S.; AMALIN, D.M.; ARAJ, S.-E.; BARRERA, G.; BELTRAN, M.J.B.; FEKIH, I. BEN; CALATAYUD, P.-A.; CICERO, L.; COKOLA, M.C.*et al.* Global scientific progress and shortfalls in biological control of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. **Biological Control**, v.191, p.105460, 2024. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2024.105460.

YADAV, I.C.; DEVI, N.L.; SYED, J.H.; CHENG, Z.; LI, J.; ZHANG, G.; JONES, K.C. Current status of persistent organic pesticides residues in air, water, and soil, and their possible effect on neighboring countries: A comprehensive review of India. **Science of The Total Environment**, v.511, p.123–137, 2015. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.041.

YANG, F.; WANG, Z.; KERNS, D.L. Resistance of *Spodoptera frugiperda* to *Cry1*, *Cry2*, and *Vip3Aa* proteins in Bt corn and cotton in the Americas: Implications for the rest of the world. **Journal of Economic Entomology**, v.115, p.1752–1760, 2022. DOI: 10.1093/jee/toac099.

ZENG, R.; YU, X.; TAN, X.; YE, S.; DING, Z. Deltamethrin affects the expression of voltage-gated calcium channel $\alpha 1$ subunits and the locomotion, egg-laying, foraging behavior of *Caenorhabditis elegans*. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.138, p.84–90, 2017. DOI: 10.1016/j.pestbp.2017.03.005.

4. ARTIGO 1

AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE E DE EFEITOS SUBLETAIS DA COMBINAÇÃO DE INSETICIDAS SINTÉTICOS E BOTÂNICOS EM *Spodoptera frugiperda*

Artigo formatado de acordo com as normas do periódico: *Crop Protection*

RESUMO

Spodoptera frugiperda é uma mariposa originária das Américas cuja elevada capacidade migratória permitiu sua disseminação em diversos países, tornando-se uma importante praga em várias culturas, especialmente no milho. Os produtores enfrentam desafios crescentes devido à resistência desse inseto aos métodos tradicionais de controle, incluindo pesticidas convencionais e culturas transgênicas. Diante desse cenário, este estudo objetivou avaliar efeitos letais e subletais da combinação de inseticidas convencionais com compostos botânicos sobre *S. frugiperda*. Para isso, foram realizados bioensaios para confirmar a suscetibilidade de *S. frugiperda* aos inseticidas clorantianiliprole, deltametrina e metomil, além de determinar curvas de mortalidade e sobrevivência para esses inseticidas e para o óleo essencial (OE) de *Lippia sidoides* e seu composto majoritário timol. Em seguida, foram conduzidos bioensaios com compostos isolados e em misturas binárias para observar interações de sinergismo, antagonismo e aditividade. Adicionalmente, foram realizados experimentos para verificar efeitos subletais sobre a capacidade olfativa dos adultos, preferência e consumo foliar de lagartas. Os resultados indicaram que *S. frugiperda* apresenta resistência ao clorantianiliprole e à deltametrina. Dentre os sintéticos, a deltametrina apresentou maior toxicidade ($DL_{50} = 0,00839 \mu\text{g}/\text{mg}$), enquanto o OE foi o mais tóxico entre os compostos botânicos ($DL_{50} = 2,690 \mu\text{g}/\text{mg}$). A combinação de inseticidas sintéticos com o OE demonstrou sinergismo, enquanto a combinação com o timol resultou em aditismo. Efeitos subletais das combinações de compostos incluíram alterações na escolha olfativa dos adultos e na preferência alimentar das larvas. Esses resultados indicam o potencial da combinação desses compostos no controle e manejo da resistência de *S. frugiperda*.

Palavras-chave: clorantianiliprole, deltametrina, *Lippia sidoides*, timol, resistência, mistura binária.

4.1. INTRODUÇÃO

A expansão da agricultura intensiva e as condições ambientais favoráveis facilitam a proliferação de insetos-praga (Tudi *et al.*, 2021). Dentre estes insetos, *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) se destaca como uma das mais devastadoras pragas nas Américas (Barros *et al.*, 2010). Originária dessa região, essa espécie demonstrou notável capacidade de invasão e adaptação, expandindo-se para a África (Goergen *et al.*, 2016), Europa (Babendreier *et al.*, 2022), Ásia e Oceania (Tay *et al.*, 2023). As larvas de *S. frugiperda* atacam principalmente gramíneas da família Poaceae, como milho (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*), arroz (*Oryza sativa*) e sorgo (*Sorghum bicolor*), embora também afetem culturas como algodão (*Gossypium hirsutum*) e soja (*Glycine max*) (Barros *et al.*, 2010; Montezano *et al.*, 2018).

O controle de *S. frugiperda* é realizado tradicionalmente com o uso de inseticidas organossintéticos e plantas transgênicas, que produzem proteínas da bactéria *Bacillus thuringiensis* Berliner (Bt) (Burtet *et al.*, 2017). No entanto, o uso intensivo e inadequado de tais estratégias favoreceu o desenvolvimento de resistência, dificultando o controle dessa praga (Paredes-Sánchez *et al.*, 2021). A resistência de *S. frugiperda* foi confirmada para diversos inseticidas, como carbamatos, piretroides, diamidas, organofosforados, inibidores da síntese de quitina, e inclusive resistência às proteínas *Cry1* (Farias *et al.*, 2014; Bolzan *et al.*, 2019; Okuma *et al.*, 2022). Este fato tem gerado perdas econômicas significativas devido ao aumento da dose e da frequência de aplicação desses produtos ou mesmo da necessidade de aplicações suplementares de inseticidas em áreas Bt (Siddiqui *et al.*, 2023).

Diante dos problemas associados aos métodos de controle convencionais, os compostos botânicos, como os óleos essenciais (OEs), derivados do metabolismo secundário de plantas, surgem como uma alternativa promissora para a proteção de culturas (Isman, 2020; Lin *et al.*, 2022; Jyotsna *et al.*, 2024). Esses compostos naturais, ricos em terpenoides, possuem múltiplas atividades biológicas: atuam como inseticidas, repelentes, fumigantes, larvicidas, ovicidas e

fungicidas, além de serem biodegradáveis e mais seguros para mamíferos (Pavela, 2015; Assadpour *et al.*, 2024; Ayllón-Gutiérrez *et al.*, 2024).

Os OEs protegem as plantas contra insetos por meio de mecanismos como o bloqueio da fitofagia, a dissuasão da ovoposição, a inibição do crescimento e a imitação de hormônios juvenis (Rattan, 2010). Um exemplo é o OE de *Lippia sidoides* Cham., uma planta da família Verbenaceae originária da Caatinga brasileira, conhecida por seu conteúdo rico em timol e carvacrol, compostos com propriedades antimicrobianas, inseticidas e antifúngicas (Araújo *et al.*, 2020; Saraiva *et al.*, 2020; Antonia *et al.*, 2024).

Estudos recentes têm relatado um importante atributo dos OEs, que se refere à sua capacidade de potencializar o efeito de inseticidas convencionais (Norris *et al.*, 2019; Fazolin *et al.*, 2016). Essa característica pode ser explorada por meio da combinação desses compostos para o manejo da resistência de pragas ou ao menos para corrigir falhas de controle apresentadas por alguns organossintéticos. Por exemplo, a combinação de deltametrina com OE de *Ocimum basilicum* (Lamiaceae) demonstrou um efeito sinérgico contra *S. frugiperda*, reduzindo a DL₅₀ da deltametrina em 80% (Silva *et al.*, 2017). Além disso, foi relatado que o tratamento combinado de OE de *Piper aduncum* com inseticidas como alfa-cipermetrina, fenpropatrina e gamma-cihalotrina aumentou a atividade larvicida contra *S. frugiperda*, permitindo reduzir as doses de inseticidas entre 25% e 50% (Fazolin *et al.*, 2016).

Diante disso, os objetivos deste estudo sobre *S. frugiperda* foram: (i) avaliar a resistência a três inseticidas convencionais, clorantprilprole (antranilamida), deltametrina (piretroide) e metomil (carbamato); (ii) testar os efeitos letais do OE de *L. sidoides*, do seu composto majoritário (timol) e dos inseticidas convencionais; (iii) verificar o efeito sinérgico do OE de *L. sidoides* e do timol, combinados com os inseticidas convencionais e; (iv) analisar os efeitos subletais do OE de *L. sidoides* e do timol, isoladamente e em combinação com os inseticidas convencionais. Os resultados desse estudo podem contribuir para potencializar a eficácia dos inseticidas convencionais, especialmente para casos comprovados de falhas no controle.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Criação dos insetos

Os insetos utilizados nos bioensaios foram provenientes de criação (> 15 gerações), mantida no Laboratório de Manejo Integrado de Pragas da Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, Sergipe (SE), (10°54' S, 37°04' W, 7 m de altitude), Brasil. O ambiente foi mantido climatizado a $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, com umidade relativa de $70 \pm 10\%$ e fotoperíodo de 12h.

Os adultos de *S. frugiperda* foram acondicionados em potes plásticos de 14 cm Ø, 15 cm de altura e volume de 2 L (Plaszom Pote 2000 mL Prt1000 St150 C/T C/12X25), revestidos com papel ofício, utilizado como substrato para oviposição. O fundo dos potes foi substituído por uma placa de Petri de vidro (14 × 1,5 cm) forrada com papel filtro e a parte superior foi vedada com tecido voal. Os adultos foram alimentados com solução de mel a 10%, fornecida *ad libitum* em recipientes plásticos com 2 cm Ø e 1 cm de altura. O papel ofício, contendo massas de ovos, foi removido a cada três dias, sendo recortadas as porções com ovos e acondicionadas em recipientes plásticos de 500 mL (Pote 500 mL Tr Plaszom C/25 Kit). A metodologia de criação dos insetos seguiu o protocolo de Lima *et al.* (2020), com pequenas modificações. Após a eclosão das larvas, ~ 6 g de dieta artificial foram adicionadas a cada recipiente, conforme o protocolo de Greene, Leppla e Dickerson (1976). Ao atingirem o terceiro ínstar, as larvas foram individualizadas em potes de 100 mL (Pote 100 mL Branco/Cristalcospos C/100) e alimentadas com dieta, renovada a cada três dias, permanecendo nesses recipientes até a fase de pupa. As pupas foram transferidas para potes plásticos de 500 mL, forrados com papel toalha, onde permaneceram até a emergência dos adultos, reiniciando o ciclo biológico.

4.2.2. Obtenção dos compostos

O OE utilizado foi extraído das folhas de *L. sidoides* (Verbenaceae) por meio de arraste a vapor, pela empresa PRONAT, situada em Horizonte, Ceará, Brasil. O timol, composto majoritário do OE (Oliveira *et al.*, 2018), foi adquirido da empresa SIGMA-ALDRICH (Saint

Louis, Missouri, EUA). Já os inseticidas organossintéticos deltametrina (Decis® 25 EC, 25 g i.a./L, Bayer S.A., São Paulo, SP), cloranthraniliprole (Premio® SC, 200 g i.a./L, FMC Química do Brasil Ltda., Campinas, SP) e o metomil (Lannate® SL, 215 g i.a./L, CTVA Proteção de Cultivos Ltda – Barueri, Tamboré) foram adquiridos comercialmente.

4.2.3. Bioensaios

Os bioensaios foram conduzidos no Laboratório de Manejo Integrado de Pragas da Universidade Federal de Sergipe (UFS), Campus São Cristóvão, SE.

Os compostos testados incluíram: os inseticidas convencionais à base de cloranthraniliprole, deltametrina e metomil; o OE de *L. sidoides* e o seu constituinte majoritário, timol. Como solventes para a diluição dos inseticidas foram utilizados água, Adesil® (Sumitomo Chemical Indústria Química S/A-Maracanaú, Ceará), acetona (Panreac, UV-IR-HPLC-GPC PAIACS, 99,9%) e Tween 80 (Dinâmica®, Diadema, SP, Brasil). Para a realização dos bioensaios com folhas de milho, utilizou-se a variedade híbrida (Milho AG 1051 Agrocere) (*Zea mays*), adquirida em comércio local.

Para determinar a massa dos insetos, 50 lagartas de terceiro ínstar de *S. frugiperda* foram individualmente pesadas em uma balança de precisão (Shimadzu, AUW220D). Posteriormente, a média da massa dessas 50 lagartas foi calculada, e o valor obtido utilizado como peso padrão para os bioensaios posteriores.

4.2.3.1. Avaliação da suscetibilidade de *Spodoptera frugiperda* aos inseticidas

A suscetibilidade das lagartas de terceiro ínstar aos três inseticidas foi avaliada utilizando uma torre de Potter (Potter Precision Laboratory Spray Tower - Burkard Scientific) para pulverização nas doses recomendadas para uso em campo, seguindo a metodologia descrita por Busato *et al.* (2006). Os inseticidas foram diluídos em água mais espalhante adesivo Adesil na concentração de 0,02%. No controle foram aplicados apenas água e Adesil a 0,02%.

Nesse bioensaio, as lagartas foram expostas aos inseticidas por três diferentes vias: (i) exposição por contato direto (**CD**), (ii) exposição por contato residual (**CR**) + ingestão (**In**) e (iii) exposição por contato direto (**CD**) + contato residual (**CR**) + ingestão (**In**). Para a exposição por (CD), 96 lagartas foram distribuídas em 12 placas de Petri ($9 \times 1,5$ cm), cada uma contendo 8 indivíduos. As placas foram pulverizadas com 2 mL da solução a uma pressão de 15 lb/pol², garantindo uma deposição de $1,5 \pm 0,5$ mg de calda/cm². Após a pulverização, as lagartas foram transferidas individualmente para poços de placas de cultura celular (Global Trade Technology, Monte Alto, SP, Brasil) (24 orifícios), forrados com papel filtro umedecido com 25 µL de água destilada (para manter a umidade), e contendo uma seção foliar de milho (~5 cm²) para alimentação das larvas.

Na exposição por ‘CR + In’, folhas de milho foram cortadas em seções de ~ 5 cm² e pulverizadas sob as mesmas condições ‘CD’. No total, 96 seções foliares foram preparadas e distribuídas em 12 placas de Petri, contendo 8 folhas cada. Após a secagem, as folhas foram transferidas para placas de cultura celular, alocando-se uma folha por poço, onde foi inserida uma lagarta não tratada para se alimentar do material pulverizado. Na exposição por ‘CD + CR + In’, o procedimento foi semelhante, com a diferença de que cada placa de Petri continha simultaneamente 8 lagartas e 8 folhas pulverizadas sob as mesmas condições e quantidades previamente descritas. Após a secagem, folhas e lagartas foram transferidas para placas de cultura celular, alocando-se uma folha e uma lagarta tratada em cada poço. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, composto por 12 repetições, cada uma com oito indivíduos, totalizando 96 lagartas por dose de cada tratamento. As avaliações foram realizadas 72 horas após a exposição. Consideraram-se mortas as lagartas que não respondiam aos estímulos feitos com um pincel.

4.2.3.2. Toxicidade

Os bioensaios para determinação das doses letais foram realizados com grupos de larvas de terceiro ínstar. Inicialmente, foram conduzidos testes preliminares com doses de 1, 5 e 10

µg das substâncias (inseticidas organossintéticos, OE e timol) por mg de inseto. Posteriormente, doses intermediárias foram utilizadas para estabelecer as curvas de dose-mortalidade, conforme Santos *et al.* (2022).

Para a diluição do OE de *L. sidoides* e do timol, foi empregada acetona com pureza de 99,9%, conforme Lima *et al.* (2020). Já os inseticidas convencionais passaram por diluições seriadas, utilizando água e acetona como solventes. Os tratamentos foram aplicados topicamente (0,5 µL) na região torácica de cada inseto, com o auxílio de uma microseringa (Hamilton®, Reno, NV, USA). A acetona, usada como solvente dos compostos botânicos, foi empregada como controle negativo, uma vez que testes preliminares demonstraram que ela não afeta negativamente a sobrevivência desses insetos.

Após a aplicação dos tratamentos, as larvas foram acondicionadas em placas de cultura celular com 24 poços, forradas com papel filtro umedecido com 25 µL de água destilada. Em cada poço, foi adicionada uma seção (~5 cm²) de folha de milho para alimentação das larvas. O delineamento experimental foi idêntico ao adotado no bioensaio de suscetibilidade.

As placas contendo as larvas tratadas foram mantidas em estufa incubadora do tipo B.O.D. (Biotech®, Piracicaba, SP, Brasil) sob condições controladas de 25 ± 0,5 °C, umidade relativa de 70 ± 10% e fotoperíodo de 12 horas. As avaliações de mortalidade foram realizadas 72 horas após a montagem do bioensaio. Diariamente o papel filtro foi novamente umedecido com 10 µL de água destilada. Foram consideradas mortas as larvas que permaneceram imóveis após estímulo com um pincel.

4.2.3.3. Tempo letal

Para determinar as curvas de sobrevivência e o tempo letal necessário para matar 50% da população (TL₅₀), larvas foram expostas às DL₉₀ previamente estabelecidas nos bioensaios de toxicidade (4.2.3.2). Os procedimentos foram semelhantes ao bioensaio de toxicidade, com a diferença de que as larvas foram individualizadas em placas de Petri (6 × 1,5 cm), forradas

com papel filtro umedecido com 200 μ L de água destilada. Em cada placa foi inserida uma seção de folha de milho ($\sim 5 \text{ cm}^2$) para as larvas se alimentarem. Para evitar a fuga dos insetos e preservar a umidade, as placas foram cobertas com plástico filme.

Foram realizadas 35 repetições por tratamento ($N = 35$). A mortalidade foi avaliada inicialmente a cada 10 minutos até completar 1 hora do início da aplicação e, em seguida, em intervalos de 30 minutos até completar 2 horas. Posteriormente, novas avaliações foram realizadas nos intervalos de 1, 2 e 4 horas, correspondendo aos tempos de 6, 24 e 48 horas após a aplicação. Após esse período, as avaliações passaram a ser realizadas a cada 24 horas, até completar 96 horas.

4.2.3.4. Combinações dos inseticidas convencionais com os compostos botânicos

Para verificar a toxicidade aguda dos inseticidas convencionais e dos compostos botânicos isoladamente e em combinação, adotou-se procedimento semelhante ao descrito anteriormente (ver tópico 4.2.3.2), inclusive quanto ao delineamento experimental.

Os valores de DL_{50} de todos os compostos (ver tópico 4.2.3.2) foram utilizados como base para determinar as doses das misturas binárias. Para isso, foram combinados os limites inferiores e superiores dos intervalos de confiança das DL_{50} dos inseticidas comerciais e dos compostos botânicos, na proporção de 1:1, conforme Oliveira *et al.* (2017).

Todos os compostos foram aplicados individualmente para quantificar a mortalidade observada e, em seguida, as aplicações foram realizadas com as combinações dos compostos, para verificar a mortalidade esperada das misturas, permitindo comparações entre os tratamentos. A mortalidade observada foi comparada à mortalidade esperada, classificando os efeitos das misturas como aditivos, sinérgicos ou antagônicos, seguindo protocolo de Oliveira *et al.* (2017) modificado.

4.2.3.5. Preferência olfativa de fêmeas

O bioensaio foi realizado para avaliar possíveis alterações na resposta olfativa de fêmeas (♀) de *S. frugiperda* ao odor de folhas de milho (substrato de oviposição) na presença de diferentes tratamentos. O experimento foi conduzido utilizando um olfatômetro em formato de “Y”, com 2,2 cm Ø, 10 cm de comprimento em cada braço e ângulo de 75° entre eles. A velocidade do fluxo de ar foi mantida constante em 0,2 L/min em cada braço. A metodologia usada foi semelhante à descrita por Zhang *et al.* (2013).

Cada braço do olfatômetro foi conectado a um recipiente de vidro hermeticamente fechado (Pote de Vidro, Potes e Cia, 800 mL, com Tampa, Ref. 341), interligado por mangueiras de teflon (Mangueira de Teflon, Tubo PTFE 4x2,5 mm, Alta Temperatura, 5 m, IM). Em cada recipiente foram colocadas três folhas de milho (~10 cm de comprimento), retiradas próximas ao cartucho de plantas com 30 dias de idade. Além disso, em um dos recipientes havia um papel filtro contendo o tratamento e no outro recipiente havia outro papel filtro com o controle. Cada papel filtro (6 cm Ø) foi umedecido com 200 µL dos tratamentos a uma concentração de 0,05%: inseticidas convencionais, OE, timol, ou a combinação dos inseticidas convencionais com os compostos botânicos. Para as combinações, a mistura dos compostos foi realizada utilizando a solução de cada composto a 0,05% na proporção 1:1 (v/v). Após a aplicação do composto, aguardou-se por três minutos, até a completa evaporação da acetona. O controle consistiu em papel filtro tratado apenas com 200 µL de acetona.

Na extremidade inicial do tubo do olfatômetro, foi introduzida uma fêmea adulta em estágio reprodutivo (três dias após a emergência das pupas). Para obter os indivíduos, 10 casais foram mantidos em potes de 2 L, forrados com papel ofício contendo solução açucarada para alimentação. Após a observação das primeiras massas de ovos, as fêmeas foram transferidas para outro pote para serem utilizadas nos testes. A sexagem dos insetos para a formação dos casais e a seleção das fêmeas utilizadas no experimento foi realizada com base na observação do dimorfismo sexual característico da espécie, conforme descrito por Wink *et al.* (2024).

Durante cada observação, o comportamento da fêmea foi monitorado até que ela

escolhesse um dos braços do olfatômetro, permanecendo no local ~1 minuto. O tempo máximo de observação foi de 3 minutos, descartando-se os indivíduos que não realizaram nenhuma escolha nesse período. As fêmeas foram substituídas a cada repetição. O olfatômetro, as folhas de milho e o papel filtro tratado foram renovados a cada cinco repetições, ocasião em que os lados do olfatômetro foram invertidos: o braço originalmente destinado ao controle passou a receber o tratamento, e vice-versa. Para cada tratamento foram utilizadas 25 fêmeas.

4.2.3.6. Preferência olfativa de machos

Este bioensaio foi conduzido para avaliar alterações na resposta olfativa de machos (♂) de *S. frugiperda* em relação ao odor de (♀) na presença de diferentes tratamentos. Os testes foram realizados utilizando um olfatômetro em “Y” da mesma forma e com as mesmas especificações do bioensaio anterior (tópico 4.2.3.5).

No entanto, diferentemente do bioensaio anterior (4.2.3.5), dentro de cada recipiente foi inserida uma (♀) virgem de *S. frugiperda* em maturidade sexual (3 dias após a emergência). Além disso, cada pote continha um papel filtro tratado com 200 µL das soluções testadas (inseticidas convencionais, OE, timol, ou a combinação do inseticida convencional com cada composto botânico) a uma concentração de 0,05%. Um dos recipientes foi usado como controle, contendo uma (♀) e o papel filtro tratado com 200 µL de acetona. Foram testadas as seguintes combinações: (i) (♀) com controle x (♀) com clorantianiliprole; (ii) (♀) com controle x (♀) com deltametrina; (iii) (♀) com controle x (♀) com OE de *L. sidoides*; (iv) (♀) com controle x (♀) com timol; (v) (♀) com controle x (♀) com mistura binária clorantianiliprole+OE de *L. sidoides*; (vi) (♀) com controle x (♀) com mistura binária clorantianiliprole+timol; (vii) (♀) com controle x (♀) com mistura binária deltametrina+OE de *L. sidoides*; (viii) (♀) com controle x (♀) com mistura binária deltametrina+timol.

Na extremidade inicial do tubo do olfatômetro, foi inserido um (♂) virgem em maturidade sexual para observar a sua resposta aos estímulos de odor. Cada observação foi

encerrada quando o inseto escolhia um dos braços do olfatômetro, permanecendo por ~1 minuto. O tempo máximo de observação foi de 3 minutos, sendo descartados os insetos que não realizaram nenhuma escolha durante esse período. Os (♂) foram substituídos a cada repetição. O olfatômetro e o papel filtro tratado foram renovados a cada cinco repetições, ocasião em que os lados do olfatômetro foram invertidos: o braço originalmente destinado ao controle passou a receber o tratamento, e vice-versa. Para cada tratamento foram utilizados 25 machos.

4.2.3.7. Preferência alimentar e consumo foliar

Para avaliar a preferência e o consumo alimentar das larvas em relação aos diferentes tratamentos, foram conduzidos bioensaios com chance de escolha, para preferência e consumo foliar e sem chance de escolha, para o consumo foliar. No teste com chance de escolha, as lagartas tiveram acesso simultâneo às folhas tratadas e não tratadas, enquanto no teste sem chance de escolha, cada grupo teve acesso apenas às folhas tratadas ou apenas às folhas não tratadas.

Para tanto, foram retiradas folhas de milho próximas ao cartucho, das quais foram feitos discos foliares de 2,2 cm Ø. Esses discos foram submersos por 10 segundos em uma solução com concentração de 0,05% de cada tratamento e suas misturas binárias. Para o preparo da solução do OE, inicialmente realizou-se a pesagem do composto, seguida da sua diluição em agente tensoativo Tween® 80 (1% v/v). Após homogeneização, adicionou-se acetona (1% v/v) à mistura, que foi novamente homogeneizada. Por fim, completou-se o volume desejado com água destilada. O procedimento para a diluição do timol seguiu as mesmas proporções adotadas para o OE; contudo, após a pesagem, o timol foi primeiramente dissolvido em acetona, antes da adição do Tween® 80 e da água. Os inseticidas foram inicialmente diluídos em água, seguidos pela adição de acetona (1% v/v) e Tween® 80 (1% v/v), com posterior homogeneização. Para o preparo das misturas binárias, as soluções individuais, previamente

preparadas, foram combinadas na proporção de 1:1 (v/v). O controle consistiu em água destilada e nos solventes utilizados para a diluição dos compostos.

Após a imersão, os discos foliares foram deixados para secar por 5 minutos e, após estarem completamente secos, foram transferidos para placas de Petri (9 × 1,5 cm), forradas com papel filtro umedecido com 1000 µL de água destilada. No bioensaio com chance de escolha, em cada placa, foram dispostos dois discos tratados e dois discos não tratados, de forma cruzada e equidistante. Para identificar os discos tratados, foi feita uma marcação no papel antes de transferir as folhas. Após a disposição das seções foliares, uma lagarta de terceiro ínstar foi liberada no centro de cada placa, que foi coberta com plástico filme.

As avaliações da preferência das lagartas foram realizadas nos tempos 5, 10, 15, 30, 60, 120, 360, 720 e 1440 minutos após a liberação das lagartas, semelhante ao protocolo usado por Campos *et al.* (2010). Ao final das 24 horas, os discos foliares que apresentaram consumo foram fotografados para posterior análise da área consumida, utilizando o software ImageJ – Versão 1.52.

O bioensaio sem chance de escolha seguiu o mesmo procedimento do teste com chance de escolha, diferindo apenas pelo uso de um único disco foliar tratado por placa. Para ambos os testes foram realizadas 40 repetições por tratamento.

4.3. Análises estatísticas

Os dados de mortalidade obtidos com o bioensaio de toxicidade foram submetidos à análise de Probit para a determinação das curvas de dose-resposta para cada tratamento, utilizando o procedimento PROC PROBIT do SAS (SAS Institute, 2008). A partir das curvas, foram estabelecidas as doses letais capazes de ocasionar 30, 50 e 90% de mortalidade (DL₃₀, DL₅₀ e DL₉₀), com seus respectivos limites de confiança a 95% de probabilidade (LC_{95%}). As DLs foram comparadas pelo critério de não sobreposição dos limites de confiança com a origem.

As análises de sobrevivência foram realizadas usando estimadores de Kaplan-Meier por meio do teste de Log-Rank (SigmaPlot, versão 14.0). Por meio dessa análise, foram obtidas as curvas de sobrevivência e tempos letais capazes de causar mortalidade em 50% dos indivíduos (TL₅₀), com seus respectivos intervalos de confiança a 95% (IC_{95%}). As curvas foram comparadas pelo método de comparações múltiplas de Holm-Sidak a 5% de probabilidade e as TL₅₀ foram comparadas pela sobreposição dos intervalos de confiança com a origem (SigmaPlot, versão 14.0).

Nos bioensaios de misturas binárias, as mortalidades esperadas foram calculadas segundo a fórmula descrita por Hummelbrunner e Isman (2001): $E = O_a + O_b (1 - O_a)$, onde: E é a mortalidade esperada, e O_a e O_b são mortalidades observadas dos compostos puros. Os efeitos das misturas binárias foram classificados por meio de comparações entre o χ^2 calculado e o χ^2 tabelado ($\chi^2_{\text{tab}} = 3,84$; g.l. = 1; $\alpha = 0,05$). O χ^2 foi calculado da seguinte forma: $\chi^2 = (O_m - E)^2 / E$, onde: O_m é a mortalidade observada da mistura binária. Valor do par analisado com $\chi^2_{\text{cal}} < 3,84$, o efeito é de aditismo (também chamado não-efeito). Valor do par analisado com $\chi^2_{\text{cal}} > 3,84$, o efeito é de sinergismo ou antagonismo. Neste último caso, deve-se observar as mortalidades esperadas e observadas das misturas binárias.

Os resultados de preferência olfativa de (♀) e (♂) submetidos aos odores dos inseticidas convencionais e inseticidas botânicos isolados e em combinação foram analisados por meio de teste de proporção, usando teste de qui-quadrado (χ^2) a $p < 0,05$ (SigmaPlot, versão 14.0). Para analisar o tempo de escolha entre um dos lados do olfatômetro, foi seguido o mesmo protocolo usado na análise de sobrevivência, comparando a sobreposição do intervalo de confiança com a média do tempo gasto para a escolha.

Os dados de preferência alimentar e consumo foliar foram inicialmente submetidos a testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variância (Brown-Forsythe). Para os conjuntos de dados que não atenderam aos pressupostos de normalidade, foram aplicadas análises não paramétricas: o teste de Mann-Whitney foi utilizado para avaliar a preferência

alimentar e o consumo foliar com chance de escolha. Para a análise do consumo foliar no bioensaio sem chance de escolha, foi realizado o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn's para comparações múltiplas.

4.4. Resultados

4.4.1. Suscetibilidade da *Spodoptera frugiperda* aos inseticidas

Houve variação significativa na eficácia dos três inseticidas convencionais testados (clorantraniliprole, deltametrina e metomil), após 72 horas da exposição das larvas por 'CD', 'CR + In' e 'CD + CR + In' (Figura 1). O metomil resultou em 100% de mortalidade nas vias de exposição por 'CD' e na exposição combinada de 'CD + CR + In'. Na exposição 'CR + In', a mortalidade causada por este inseticida foi de $93,8 \pm 1,9\%$ (Figura 1). Por outro lado, tanto o clorantraniliprole quanto a deltametrina apresentaram mortalidades inferiores a 80% em todas as vias de exposição. Na média das três vias de exposição, estes inseticidas causaram $28,5 \pm 3,4\%$ e $14,6 \pm 2,4\%$ de mortalidade, respectivamente (Figura 1). A alta mortalidade causada por metomil justifica sua exclusão dos demais bioensaios, uma vez que os dados indicam que, para esse composto, a população de lagartas testadas não apresenta resistência.

4.4.2. Toxicidade

Tanto os inseticidas convencionais (clorantraniliprole e deltametrina) quanto os compostos botânicos (OE de *L. sidoides* e timol) foram tóxicos para larvas de terceiro ínstar de *S. frugiperda* (Figura 2). As doses letais necessárias para matar 50% da população (DL_{50}) foram de $0,00839 \mu\text{g}/\text{mg}$ para a deltametrina, $0,0728 \mu\text{g}/\text{mg}$ para o clorantraniliprole, $2,690 \mu\text{g}/\text{mg}$ para o OE e $4,486 \mu\text{g}/\text{mg}$ para o timol (Figura 2). Embora os inseticidas convencionais apresentem uma maior toxicidade em relação aos compostos botânicos, conforme indicado pelas DL_{50} , as curvas de toxicidade dos compostos botânicos mostraram inclinações mais acentuadas, resultando em toxicidades superiores em doses mais elevadas. Dessa forma, os

compostos botânicos igualaram a toxicidade dos inseticidas convencionais nas doses letais 93 e 96 para clorantraniliprole e deltametrina, respectivamente (Figura 2).

4.4.3. Tempo letal

As larvas expostas à DL₉₀ dos compostos apresentaram redução significativa na sobrevivência ao longo do tempo (Teste de Log-rank: $\chi^2 = 124,938$; g.l = 4; $p < 0,001$) (Figura 3). Todos os inseticidas causaram 100% de mortalidade com menos de 96 horas (Figura 3).

Entre os inseticidas convencionais, a curva de sobrevivência do clorantraniliprole apresentou diferença significativa em relação à curva de sobrevivência da deltametrina. Por outro lado, as curvas dos inseticidas botânicos mostraram-se semelhantes entre si e em comparação com os inseticidas convencionais. Os menores tempos letais necessários para matar 50% da população de *S. frugiperda* foram observados para a deltametrina (TL₅₀ = 9,5h; IC_{95%} = 6,3-12,6) e o timol (TL₅₀ = 12,4h; IC_{95%} = 5,9-18,9), que não diferiram entre si. Da mesma forma, o tempo letal do clorantraniliprole (TL₅₀ = 25,4h; IC_{95%} = 18,9-31,9) não diferiu significativamente do tempo letal observado para *L. sidoides* (TL₅₀ = 28,6h; IC_{95%} = 15,9-41,2).

4.4.4. Combinações dos inseticidas convencionais com os compostos botânicos

O efeito da combinação entre os inseticidas sintéticos e botânicos foi avaliado utilizando os limites superiores e inferiores do intervalo de confiança da DL₅₀, estabelecidos no bioensaio de toxicidade (Figura 2). Ao combinar os limites inferiores dos compostos, observou-se um efeito sinérgico nas misturas do OE com clorantraniliprole e do OE com deltametrina, tendo em vista que os valores de χ^2 calculados foram superiores aos χ^2 tabelados (Figura 4a).

O mesmo efeito sinérgico foi verificado na combinação dos limites superiores da DL₅₀ do clorantraniliprole com o OE e da deltametrina com OE (Figura 4b). Por outro lado, as combinações envolvendo o clorantraniliprole com timol e deltametrina com timol apresentaram

valores de χ^2 calculados inferiores ao χ^2 tabelado, tanto na mistura dos limites superiores quanto na dos limites inferiores, caracterizando efeito aditivo (Figura 4a e 4b).

4.4.5. Preferência olfativa de fêmeas

No bioensaio de preferência olfativa de (♀), avaliou-se a capacidade dos inseticidas convencionais e botânicos, isoladamente e em combinação, de alterar a escolha das (♀) em relação ao substrato de oviposição.

Os resultados evidenciaram que a maior parte das fêmeas expostas aos tratamentos preferiu o lado em que o odor do substrato não estava misturado com o odor dos compostos, exceto o timol e suas misturas binárias com os inseticidas convencionais (Figura 5a).

Além do lado escolhido, foi possível mensurar o tempo médio de escolha dos insetos entre os diferentes lados do olfatômetro. Assim, verificou-se que, quando os compostos provocaram repelência nas (♀), como o clorantraniliprole e sua mistura com o OE de *L. sidoides*, elas tenderam a escolher o lado não tratado de maneira mais rápida, em menos de 60 segundos (Figura 5b). Da mesma forma, a deltametrina, o OE de *L. sidoides* e a mistura binária destes compostos propiciaram uma escolha mais rápida para o lado não tratado (Figura 5b).

4.4.6. Preferência olfativa de machos

No bioensaio de preferência olfativa, avaliou-se o efeito dos compostos, isolados e em combinação, na escolha dos (♂) em relação ao odor das (♀). Entre os compostos testados de forma isolada, o inseticida convencional deltametrina e o OE de *L. sidoides* mostraram-se igualmente repelentes, com 72% dos machos optando pelo lado não tratado (Figura 5c). Nas combinações, a mistura entre a deltametrina e o OE destacou-se como a mais repelente, fazendo com que a maior proporção dos (♂) escolhesse o lado não tratado do olfatômetro (Figura 5c). Já os tratamentos com clorantraniliprole e timol não provocaram repelência significativa, mesmo quando em combinações (Figura 5c).

Com relação ao tempo de escolha dos (♂), foi verificado que os compostos mais repelentes (deltametrina, OE e a mistura de ambos) provocaram uma escolha mais rápida do (♂), fazendo com que ele optasse pelo lado em que o odor da fêmea não estava misturado ao odor dos tratamentos (Figura 5d).

4.4.7. Preferência alimentar e consumo foliar

Os resultados do bioensaio de preferência alimentar mostraram que as lagartas preferiram os discos foliares não tratados. No entanto, foi observado um efeito incomum nos bioensaios com folhas tratadas com clorantraniliprole, tanto isolado quanto em combinação com compostos botânicos, nos quais houve uma tendência de preferência por essas folhas tratadas (Figura 6b).

No bioensaio de consumo foliar com chance de escolha, os tratamentos com timol e com os inseticidas convencionais, assim como as combinações destes compostos, reduziram significativamente o consumo das lagartas. Já a quantidade consumida pelas lagartas nos tratamentos com o OE de *L. sidoides* e suas misturas binárias não diferiu do controle (Figura 6c). No teste sem chance de escolha, os tratamentos que mais inibiram o consumo foram os inseticidas convencionais (<1 mm²) e a combinação de clorantraniliprole com timol (<7 mm²) (Figura 6d).

4.5. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o teste de suscetibilidade usando torre de Potter, evidenciaram a baixa mortalidade de *S. frugiperda* quando exposta aos inseticidas clorantraniliprole e deltametrina, ambos com eficiência inferior a 80%. Esse valor corresponde ao limite mínimo de eficácia exigido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para o registro de inseticidas (MAPA, 2023). Por outro lado, o inseticida metomil, provocou 100% de mortalidade nas vias de exposição de (CD) e (CD+CR+In). Esses dados são corroborados por estudos anteriores que relataram a evolução da resistência de *S. frugiperda* a

diversas classes de inseticidas (Yu *et al.*, 2003), incluindo as diamidas e piretroides, como o clorantraniliprole e a deltametrina, respectivamente (Bolzan *et al.*, 2019; Gutiérrez-Moreno *et al.*, 2019; Posos-Parra *et al.*, 2024). Os elevados casos de resistência a esses e outros inseticidas podem ser atribuídos ao uso indiscriminado desses produtos ao longo dos anos, resultando em pressão de seleção sobre as diferentes populações (Sparks e Nauen, 2015).

A baixa mortalidade das lagartas expostas ao clorantraniliprole pode estar associada a alterações em receptores rianodínicos, frequentemente observados em populações de *S. frugiperda* expostas a diamidas (Lv *et al.*, 2021). Já a baixa mortalidade observada para a deltametrina pode ser explicada pela presença de mutações em genes codificadores dos canais de sódio voltagem-dependentes, os principais alvos desse inseticida (Carvalho *et al.*, 2013; Guan *et al.*, 2021). Por outro lado, a alta suscetibilidade ao metomil indica que a população de *S. frugiperda* usada neste trabalho ainda não apresenta padrões de resistência a essa classe de inseticida, apesar de já haver relato de padrões de resistência de outras populações da lagarta-do-cartucho para o metomil, como verificado por Yu e Nguyen (1994).

O bioensaio de toxicidade indicou que todos os compostos testados foram tóxicos para as larvas de terceiro ínstar. Os inseticidas convencionais, como clorantraniliprole e deltametrina, apresentaram maior toxicidade em comparação aos compostos botânicos. No entanto, em doses mais altas ($\sim DL_{95}$) a toxicidade dos inseticidas botânicos se equipara às mortalidades causadas pelos inseticidas convencionais. Isso se deve às maiores inclinações das curvas obtidas para os inseticidas botânicos em relação aos convencionais. Dessa forma, a população de *S. frugiperda* responde de forma mais homogênea aos compostos botânicos.

Entre os compostos botânicos, o OE de *L. sidoides* se destacou por apresentar toxicidade superior ao seu composto majoritário, o timol. Essa diferença pode ser atribuída à complexidade de seus constituintes, que, em combinação, podem exercer efeitos sinérgicos (Fazolin *et al.*, 2016). A toxicidade observada para o OE está, em grande parte, relacionada ao timol, cuja ação

pode ter sido potencializada pela interação com outros constituintes menos expressivos (Bakkali *et al.*, 2008; Niculau *et al.*, 2013).

A toxicidade do timol pode estar associada à sua capacidade de inibir as enzimas do complexo P450, responsáveis pela desintoxicação de xenobióticos nos insetos (Gaire *et al.*, 2021). Em um estudo com *Spodoptera litura*, Ruttanaphan e Bullangpoti (2022) observaram que o timol reduziu a atividade dessas enzimas, um mecanismo que possivelmente também ocorre em *S. frugiperda*. Além disso, a inibição do complexo P450 pode ter potencializado outras ações tóxicas do timol, uma vez que esse monoterpeno pode se ligar ao neurotransmissor inibitório ácido gama-aminobutírico (GABA). Essa interação leva à abertura dos canais de cloro (Cl^-), aumentando o influxo desse íon nos neurônios, resultando em alterações nos impulsos nervosos e, conseqüentemente, na morte dos insetos (Tong e Coats, 2012).

A análise do tempo letal (TL_{50}) revelou que a deltametrina foi o composto com o menor tempo letal, causando a morte das larvas de forma rápida. Esse resultado está alinhado com estudos que destacam a ação rápida dos piretroides devido à sua interferência no sistema nervoso central dos insetos (Soderlund, 2010). Por outro lado, o clorraniliprole apresentou TL_{50} maior, sugerindo que sua eficácia depende de um período de exposição mais longo para induzir a mortalidade dos insetos. Nesse bioensaio, foi observado que ao serem expostas a esse inseticida, as larvas diminuam sua movimentação, o que é um sintoma da ação desse composto nos receptores rianodínicos. Muito provavelmente, a paralisia muscular resultante impediu a alimentação desses insetos, justificando assim sua mortalidade mais lenta devido à inanição (Teixeira e Andaloro, 2013). Um resultado semelhante foi reportado por Buczkowski, Scherer e Bennett (2012), em um estudo com cupins, no qual foi observado que, após a exposição ao clorraniliprole, os insetos cessaram a alimentação e demoraram mais tempo para morrer.

A análise das combinações entre os inseticidas botânicos e os inseticidas convencionais revelou que a mistura de OE com clorraniliprole e de OE com deltametrina, utilizando os limites superiores e inferiores dos intervalos de confiança das DL_{50} desses compostos,

apresentou efeito sinérgico. Em contrapartida, a mistura de timol com esses mesmos inseticidas exibiu efeito aditivo. A sinergia observada nas combinações com o OE pode ser atribuída à complexidade de seus constituintes, pois mesmo em menor proporção, os compostos não majoritários podem interagir entre si, influenciando a atividade biológica do OE (Jiang *et al.*, 2009; Akhtar *et al.*, 2012), bem como sua interação com os inseticidas convencionais (Fazolin *et al.*, 2024).

Esses resultados reforçam o papel dos OEs como potencializadores de inseticidas convencionais. Estudos revelam que os OEs podem, em um primeiro contato, exercer ação neurotóxica nos insetos, como a inibição da enzima acetilcolinesterase (Anderson e Coats, 2012), a interferência na ação da octopamina (Rattan, 2010) e a atuação nos canais de cloro modulados pelo ácido gama-aminobutírico (GABA) (Isman, 2006). Nesse contexto, a combinação do OE de *L. sidoides* com clorantraniliprole e do OE com deltametrina pode ter ampliado a ação neurotóxica desses compostos, possivelmente por atuar em componentes do sistema nervoso dos insetos que também é o local alvo desses organossintéticos (Jankowska *et al.*, 2017). Em contraste, o efeito aditivo das combinações com timol isolado sugere que a ausência de constituintes minoritários limitou seu potencial tóxico, uma vez que não houve interações sinérgicas. Tak e Isman (2017) observaram que a toxicidade do timol foi potencializada quando combinado com *p*-cimeno, indicando uma maior capacidade de penetração cuticular da mistura em comparação com o composto isolado, um efeito que possivelmente poderia ter ocorrido em *S. frugiperda*.

Estudos anteriores sugerem que o uso de OEs pode reduzir a pressão de seleção sobre populações de insetos, retardando o desenvolvimento da resistência (Isman, 2006). Esse efeito é atribuído à presença de múltiplos compostos presentes nos OEs, que atuam em diferentes alvos biológicos, dificultando a adaptação dos insetos (Pavela e Benelli, 2016). Além disso, o efeito positivo encontrado nas combinações com o OE pode reduzir a quantidade de pesticidas na calda, diminuindo os custos de controle. Quando aliado à menor probabilidade de

desenvolvimento de resistência, esse fator torna essa abordagem promissora para o manejo mais sustentável de *S. frugiperda* (Ribeiro *et al.*, 2003). Adicionalmente, a biodegradabilidade, característica comum dos OEs, minimiza os impactos ambientais, reduzindo o risco de efeitos adversos sobre organismos não alvo e garantindo maior segurança no manejo de pragas (Pavela e Benelli, 2016).

No bioensaio de preferência olfativa realizado com (♂) e (♀), expostos a compostos botânicos e convencionais, de forma isolada e combinada, observou-se uma tendência dos insetos em evitar o lado tratado. Esse comportamento destaca a capacidade dos insetos em detectar e evitar a presença de xenobióticos no ambiente (Brito *et al.*, 2020). Essa resposta está em concordância com a já conhecida ação repelente dos OEs, amplamente atribuída à sua complexa mistura de compostos voláteis (Pavela, 2015). Além disso, o bioensaio revelou que a combinação de OE com inseticidas convencionais pode potencializar a ação repelente desses compostos, constituindo promissores dissuasores de oviposição das (♀), e repelir os (♂) das (♀), reduzindo a possibilidade de encontro e cópula desses insetos.

Por outro lado, uma observação distinta foi registrada nos tratamentos com timol. Nesse caso, tanto (♂) quanto (♀) não demonstraram diferença significativa na escolha entre os lados do olfatômetro. Esses resultados sugerem que, quando isolado, o timol pode não possuir o mesmo efeito repelente observado na mistura com outros constituintes do OE. A ausência de interações sinérgicas entre os compostos voláteis presentes nas misturas analisadas neste trabalho parece reduzir a eficácia do timol como agente repelente.

A preferência olfativa observada nas mariposas pelo odor contendo timol pode ser explicada pela presença desse composto em várias plantas aromáticas, que podem atuar como fontes de alimento, como o néctar utilizado pelas mariposas. Algumas famílias de plantas possuem espécies que produzem o timol como um de seus constituintes químicos, como observado nas famílias Lamiaceae (ex: *Ocimum gratissimum* L., *Origanum vulgare* L. e *Thymus vulgaris* L.), Verbenaceae (ex: *Lippia alba*) e Asteraceae (ex: *Bidens pilosa* L.) (Borges

et al., 2012; Ventura *et al.*, 2019; Haida, 2007). Logo, as mariposas usadas nos bioensaios podem ter optado pelo odor do timol por associá-lo a uma possível fonte alimentar.

No bioensaio de preferência alimentar, as lagartas demonstraram maior preferência pelos discos foliares não tratados (Figura 6b). No entanto, houve preferência das lagartas por folhas tratadas com clorantraniliprole, isolado ou em combinação com compostos botânicos (Figura 6b). Este comportamento é incomum e não relatado na literatura. Contudo, pode ser explicado pelo fato de o clorantraniliprole não apresentar características repelentes para alguns insetos, conforme relatado por Pazini *et al.* (2016) e Antigo *et al.* (2013), o que pode justificar a escolha das lagartas pelas folhas tratadas com esse inseticida. Além disso, o clorantraniliprole pode ter interagido com compostos botânicos e mascarado os seus odores (Mauchline *et al.*, 2005), reduzindo a percepção dos insetos sobre a presença dessas substâncias. Isso é evidenciado pelo fato de que, quando os compostos botânicos foram aplicados isoladamente, houve repelência.

No entanto, a preferência pelas folhas tratadas com clorantraniliprole não resultou em maior consumo de área foliar. Tanto nos tratamentos com possibilidade de escolha (Figura 6c) quanto naqueles sem escolha (Figura 6d), as lagartas consumiram menos as folhas tratadas. Isso sugere que, embora os insetos não tenham detectado imediatamente o tratamento, foram contaminados ao entrar em contato com o clorantraniliprole, o que pode ter afetado negativamente seu comportamento alimentar.

Por outro lado, a repelência provocada pelos compostos botânicos pode ser atribuída à complexa mistura de constituintes voláteis, que possivelmente atuaram como agentes dissuasores, diminuindo a preferência das lagartas pelas folhas tratadas. Esse resultado corrobora com estudos realizados por Nerio *et al.* (2010) e Souza da Cruz *et al.* (2024) (Figura 6b). Já o consumo observado em folhas tratadas com os compostos botânicos, tanto nos testes com escolha quanto sem escolha, pode ser explicado pela rápida degradabilidade de seus compostos voláteis (Regnault-Roger *et al.*, 2012) (Figuras 6c e 6d).

Com relação à deltametrina, a menor atratividade pode ser atribuída à sua ação repelente, característica comum dos piretroides, como demonstrado por Fernandes *et al.* (2016) (Figura 6b). Além disso, sua rápida ação neurotóxica pode ter afetado os insetos mesmo em baixas concentrações, impedindo a aproximação das lagartas às folhas tratadas, conforme descrito por Casida e Durkin (2013) e Sparks e Nauen (2015). Essas características explicam o menor consumo das folhas tratadas com a deltametrina, tanto isolada quanto em combinação (Figuras 6c e 6d).

De forma geral, os tratamentos repeliram os insetos e diminuíram o seu consumo foliar, evidenciando os efeitos subletais dos compostos testados sobre o comportamento alimentar das larvas de *S. frugiperda*.

4.6. CONCLUSÃO

Este estudo confirmou a resistência de *S. frugiperda* aos inseticidas clorantraniliprole e deltametrina, enquanto o metomil demonstrou alta eficácia. O OE de *L. sidoides* mostrou-se mais tóxico do que seu composto majoritário (timol), sugerindo um efeito sinérgico entre seus constituintes. Além disso, as combinações do OE com clorantraniliprole e deltametrina evidenciaram sinergismo, indicando seu potencial para o manejo da resistência de *S. frugiperda*. Os efeitos subletais observados, como a alteração na percepção olfativa e a redução do consumo foliar, reforçam a aplicabilidade desses compostos no manejo dessa praga.

Com base nesses resultados, o uso de OE surge como uma alternativa promissora para o manejo integrado de pragas. Pesquisas futuras devem avaliar a estabilidade e persistência desses compostos no campo, sua compatibilidade com outros métodos de controle e seu impacto sobre organismos não alvo. Além disso, estudos sobre os mecanismos de sinergismo com inseticidas convencionais podem otimizar formulações mais eficazes e sustentáveis para o controle de *S. frugiperda*.

4.7. REFERÊNCIAS

- AKHTAR, Y.; PAGES, E.; STEVENS, A.; BRADBURY, R.; CAMARA, C.A.G.; ISMAN, M.B. Effect of chemical complexity of essential oils on feeding deterrence in larvae of the cabbage looper. **Physiological Entomology**, v.37, p.81–91, 2012. DOI: 10.1111/j.1365-3032.2011.00824.x.
- ANDERSON, J.A.; COATS, J.R. Acetylcholinesterase inhibition by nootkatone and carvacrol in arthropods. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.102, p.124–128, 2012. DOI: 10.1016/j.pestbp.2011.12.002.
- ANTIGO, M.R.; OLIVEIRA, H.N.; CARVALHO, G.A.; PEREIRA, F.F. Repelência de produtos fitossanitários usados na cana-de-açúcar e seus efeitos na emergência de *Trichogramma galloi*. **Revista Ciência Agrônômica**, v.44, p.910–916, 2013. DOI: 10.1590/S1806-66902013000400030.
- ANTONIA, B.D.; OLIVEIRA, J.; SILVA, P.P.M.; BIAZOTTO, A.M.; TOLEDO, N.M.V.; GLÓRIA, E.M.; SPOTO, M.H.F. Positive effect of *lippia sidoides* essential oil associated with carboxymethylcellulose in the control of anthracnose in avocado. **Food Production, Processing and Nutrition**, v.6, p.39, 2024. DOI: 10.1186/s43014-023-00209-1.
- ARAÚJO, M.J.C.; CAMARA, C.A.G.; MORAES, M.M.; BORN, F.S. Insecticidal properties and chemical composition of *Piper aduncum* L., *Lippia sidoides* Cham. and *Schinus terebinthifolius* Raddi essential oils against *Plutella xylostella* L. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.92, 2020. DOI: 10.1590/0001-3765202020180895.
- ASSADPOUR, E.; CAN KARAÇA, A.; FASAMANESH, M.; MAHDAVI, S.A.; SHARIAT-ALAVI, M.; FENG, J.; KHARAZMI, M.S.; REHMAN, A.; JAFARI, S.M. Application of essential oils as natural biopesticides; recent advances. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.64, p.6477–6497, 2024. DOI: 10.1080/10408398.2023.2170317.
- AYLLÓN-GUTIÉRREZ, R.; DÍAZ-RUBIO, L.; MONTAÑO-SOTO, M.; HARO-VÁZQUEZ, M. DEL P.; CÓRDOVA-GUERRERO, I. Applications of plant essential oils in pest control and their encapsulation for controlled release: A Review. **Agriculture**, v.14, p.1766, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14101766.
- BABENDREIER, D.; TOEPFER, S.; BATEMAN, M.; KENIS, M. Potential management options for the invasive moth *Spodoptera frugiperda* in Europe. **Journal of Economic Entomology**, v.115, p.1772–1782, 2022. DOI: 10.1093/jee/toac089.
- BAKKALI, F.; AVERBECK, S.; AVERBECK, D.; IDAOMAR, M. Biological effects of essential oils – A review. **Food and Chemical Toxicology**, v.46, p.446–475, 2008. DOI: 10.1016/j.fct.2007.09.106.
- BARROS, E.M.; TORRES, J.B.; RUBERSON, J.R.; OLIVEIRA, M.D. Development of *Spodoptera frugiperda* on different hosts and damage to reproductive structures in cotton. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v.137, p.237–245, 2010. DOI: 10.1111/j.1570-7458.2010.01058.x.
- BOLZAN, A.; PADOVEZ, F.E.; NASCIMENTO, A.R.; KAISER, I.S.; LIRA, E.C.; AMARAL, F.S.; KANNO, R.H.; MALAQUIAS, J.B.; OMOTO, C. Selection and characterization of the inheritance of resistance of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera:

- Noctuidae) to chlorantraniliprole and cross-resistance to other diamide insecticides. **Pest Management Science**, v.75, p.2682–2689, 2019. DOI: 10.1002/ps.5376.
- BORGES, A.M.; PEREIRA, J.; CARDOSO, M.G.; ALVES, J.A.; LUCENA, E.M.P. Determinação de óleos essenciais de alfavaca (*Ocimum gratissimum* L.), orégano (*Origanum vulgare* L.) e tomilho (*Thymus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v.14, p.656–665, 2012. DOI: 10.1590/S1516-05722012000400013.
- BRITO, F.A.; BACCI, L.; SANTANA, A.S.; SILVA, J.E.; NIZIO, D.A.C.; NOGUEIRA, P.C.L.; ARRIGONI-BLANK, M.F.; MELO, C.R.; MELO, J.O.; BLANK, A.F. Toxicity and behavioral alterations caused by essential oils of *Croton tetradenius* and their major compounds on *Acromyrmex balzani*. **Crop Protection**, v.137, p.105259, 2020. DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105259.
- BUCZKOWSKI, G.; SCHERER, C.W.; BENNETT, G.W. Toxicity and horizontal transfer of chlorantraniliprole in the eastern subterranean termite. **Journal of Economic Entomology**, v.105, p.1736–1745, 2012. DOI: 10.1603/EC12038.
- BURTET, L.M.; BERNARDI, O.; MELO, A.A.; PES, M.P.; STRAHL, T.T.; GUEDES, J.V. Managing fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), with Bt maize and insecticides in southern Brazil. **Pest Management Science**, v.73, p.2569–2577, 2017. DOI: 10.1002/ps.4660.
- BUSATO, G.R.; GRUTZMACHER, A.D.; GARCIA, M.S.; GIOLO, F.P.; MARTINS, A.F. Consumo e utilização de alimento por *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) originária de diferentes regiões do Rio Grande do Sul, das culturas do milho e do arroz Irrigado. **Neotropical Entomology**, v.31, p.525–529, 2002. DOI: 10.1590/S1519-566X2002000400003.
- BUSATO, G. R.; GRÜTZMACHER, A. D.; GARCIA, M. S.; ZOTTI, M. J.; NÖRNBERG, S. D.; MAGALHÃES, T. R.; MAGALHÃES, J. DE B. Susceptibilidade de lagartas dos biótipos milho e arroz de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) a inseticidas com diferentes modos de ação. *Ciência Rural*, v. 36, n. 1, p. 15–20, fev. 2006.
- CAMPOS, A.P.; BOIÇA JUNIOR, A.L.; RIBEIRO, Z.A. Não-preferência para oviposição e alimentação de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) por cultivares de amendoim. **Arquivos do Instituto Biológico**, v.77, p.251–258, 2010. DOI: 10.1590/1808-1657v77p2512010.
- CARVALHO, R.A.; OMOTO, C.; FIELD, L.M.; WILLIAMSON, M.S.; BASS, C. Investigating the molecular mechanisms of organophosphate and pyrethroid resistance in the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. **PLoS ONE**, v.8, p.e62268, 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0062268.
- CASIDA, J.E.; DURKIN, K.A. Neuroactive insecticides: targets, selectivity, resistance, and secondary effects. **Annual Review of Entomology**, v.58, p.99–117, 2013. DOI: 10.1146/annurev-ento-120811-153645.
- CRUZ, I.L.S.; NASCIMENTO, T.A.; MALECK, M.; QUEIROZ, M.M.C Da História às práticas modernas: a função dos leos Essenciais na Sustentabilidade e no Controle de Insetos. **Revista Mosaico**, v.15, p.86–96, 2024. DOI: 10.21727/rm.v15i2.4824.

- FARIAS, J.R.; ANDOW, D.A.; HORIKOSHI, R.J.; SORGATTO, R.J.; FRESIA, P.; SANTOS, A.C.; OMOTO, C. Field-evolved resistance to *Cry1F* maize by *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **Crop Protection**, v.64, p.150–158, 2014. DOI: 10.1016/j.cropro.2014.06.019.
- FAZOLIN, M.; ESTRELA, J.L.V.; MEDEIROS, A.F.M.; SILVA, I.M.; GOMES, L.P.; SILVA, M.S.F. Synergistic potential of dillapiole-rich essential oil with synthetic pyrethroid insecticides against fall armyworm. **Ciência Rural**, v.46, p.382–388, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20141500.
- FAZOLIN, M.; MONTEIRO, A.F.M.; BIZZO, H.R.; MAISFORTE, N.S.; LIMA, M.E.C.; GAMA, P.E. **Infoteca-e: Formulação da fração terpênica do óleo de *Piper aduncum* L. como sinergista de inseticidas químicos**. Rio Branco, AC: 2024.
- FERNANDES, M.E.S.; ALVES, F.M.; PEREIRA, R.C.; AQUINO, L.A.; FERNANDES, F.L.; ZANUNCIO, J.C. Lethal and sublethal effects of seven insecticides on three beneficial insects in laboratory assays and field trials. **Chemosphere**, v.156, p.45–55, 2016. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.04.115.
- GAIRE, S.; ZHENG, W.; SCHARF, M. E.; GONDHALEKAR, A. D. Plant essential oil constituents enhance deltamethrin toxicity in a resistant population of bed bugs (*Cimex lectularius* L.) by inhibiting cytochrome P450 enzymes. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, v. 175, p. 104829, jun. 2021.
- GOERGEN, G.; KUMAR, P.L.; SANKUNG, S.B.; TOGOLA, A.; TAMÒ, M. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in west and central Africa. **PLOS ONE**, v.11, p.1–9, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0165632.
- GUAN, F.; ZHANG, J.; SHEN, H.; WANG, X.; PADOVAN, A.; WALSH, T.K.; TAY, W.T.; GORDON, K.H.J.; JAMES, W.; CZEPAK, C.; OTIM, M.H.; KACHIGAMBA, D.; WU, Y. Whole-genome sequencing to detect mutations associated with resistance to insecticides and Bt proteins in *Spodoptera frugiperda*. **Insect Science**, v.28, p.627–638, 2021. DOI: 10.1111/1744-7917.12838.
- GUTIÉRREZ-MORENO, R.; MOTA-SANCHEZ, D.; BLANCO, C.A.; WHALON, M.E.; TERÁN-SANTOFIMIO, H.; RODRIGUEZ-MACIEL, J.C.; DIFONZO, C. Field-evolved resistance of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to synthetic Insecticides in Puerto Rico and Mexico. **Journal of Economic Entomology**, v.112, p.792–802, 2019. DOI: 10.1093/jee/toy372.
- HAIDA, K.S.; PARZIANELLO, L.; WERNER, S.; GARCIA, D.R.; INÁCIO, C.V. Avaliação in vitro da atividade antimicrobiana de oito espécies de plantas medicinais. **Arq. Ciênc. Saúde Unipar, Umuarama**, v.11, p.185–192, 2007.
- HUMMELBRUNNER, L.A.; ISMAN, M.B. Acute, sublethal, antifeedant, and synergistic effects of monoterpenoid essential oil compounds on the tobacco cutworm, *Spodoptera litura* (Lep., Noctuidae). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.49, p.715–720, 2001. DOI: 10.1021/jf000749t.

- ISMAN, M.B. Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. **Annual Review of Entomology**, v.51, p.45–66, 2006. DOI: 10.1146/annurev.ento.51.110104.151146.
- ISMAN, M.B. Botanical insecticides in the twenty-first century—fulfilling their promise? **Annual Review of Entomology**, v.65, p.233–249, 2020. DOI: 10.1146/annurev-ento-011019-025010.
- JANKOWSKA, M.; ROGALSKA, J.; WYSZKOWSKA, J.; STANKIEWICZ, M. Molecular Targets for Components of Essential Oils in the Insect Nervous System—A Review. **Molecules**, v.23, p.34, 2017. DOI: 10.3390/molecules23010034.
- JIANG, Z.; AKHTAR, Y.; BRADBURY, R.; ZHANG, X.; ISMAN, M.B. Comparative toxicity of essential oils of *litsea pungens* and *litsea cubeba* and blends of their major constituents against the cabbage looper, *Trichoplusia ni*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.57, p.4833–4837, 2009. DOI: 10.1021/jf900274r.
- JYOTSNA, B.; PATIL, S.; PRAKASH, Y.S.; RATHNAGIRI, P.; KISHOR, P.B.K.; JALAJA, N. Essential oils from plant resources as potent insecticides and repellents: Current status and future perspectives. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v.61, p.103395, 2024. DOI: 10.1016/j.bcab.2024.103395.
- LIMA, A.P.S.; SANTANA, E.D.R.; SANTOS, A.C.C.; SILVA, J.E.; RIBEIRO, G.T.; PINHEIRO, A.M.; SANTOS, Í.T.B.F.; BLANK, A.F.; ARAÚJO, A.P.A.; BACCI, L. Insecticide activity of botanical compounds against *Spodoptera frugiperda* and selectivity to the predatory bug *Podisus nigrispinus*. **Crop Protection**, v.136, p.105230, 2020. DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105230.
- LIN, H.-J.; LIN, Y.-L.; HUANG, B.-B.; LIN, Y.-T.; LI, H.-K.; LU, W.-J.; LIN, T.-C.; TSUI, Y.-C.; LIN, H.-T.V. Solid- and vapour-phase antifungal activities of six essential oils and their applications in postharvest fungal control of peach (*Prunus persica* L. Batsch). **LWT**, v.156, p.113031, 2022. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.113031.
- LV, S.; SHI, Y.; ZHANG, J.; LIANG, P.; ZHANG, L.; GAO, X. Detection of ryanodine receptor target-site mutations in diamide insecticide-resistant *Spodoptera frugiperda* in China. **Insect Science**, v.28, p.639–648, 2021. DOI: 10.1111/1744-7917.12896.
- MAPA. Lei n.º 14.785, de 27 de dezembro de 2023 – Nova Lei de Agrotóxicos. **Brasil - DF**, 2023. Planalto, Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/114785.htm>. Acesso em: 30 jan 2025.
- MAUCLINE, A.L.; OSBORNE, J.L.; MARTIN, A.P.; POPPY, G.M.; POWELL, W. The effects of non-host plant essential oil volatiles on the behaviour of the pollen beetle *Meligethes aeneus*. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v.114, p.181–188, 2005. DOI: 10.1111/j.1570-7458.2005.00237.x.
- MONTEZANO, D.G.; SPECHT, A.; SOSA-GÓMEZ, D.R.; ROQUE-SPECHT, V.F.; SOUSA-SILVA, J.C.; PAULA-MORAES, S.V.; PETERSON, J.A.; HUNT, T.E. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the americas. **African Entomology**, v.26, p.286–300, 2018. DOI: 10.4001/003.026.0286.

- NERIO, L.S.; OLIVERO-VERBEL, J.; STASHENKO, E. Repellent activity of essential oils: A review. **Bioresource Technology**, v.101, p.372–378, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.07.048.
- NICULAU, E.S.; ALVES, P.B.; NOGUEIRA, P.C.L.; MORAES, V.R.S.; MATOS, A.P.; BERNARDO, A.R.; VOLANTE, A.C.; FERNANDES, J.B.; SILVA, M.F.G.F.; CORRÊA, A.G.; BLANK, A.F.; SILVA, A.C.; RIBEIRO, L. DO P. Atividade inseticida de óleos essenciais de *Pelargonium graveolens* l’Herit e *Lippia alba* (Mill) N. E. Brown sobre *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). **Química Nova**, v.36, p.1391–1394, 2013. DOI: 10.1590/S0100-40422013000900020.
- NORRIS, E.J.; GROSS, A.D.; BARTHOLOMAY, L.C.; COATS, J.R. Plant essential oils synergize various pyrethroid insecticides and antagonize malathion in *Aedes aegypti*. **Medical and Veterinary Entomology**, v.33, p.453–466, 2019. DOI: 10.1111/mve.12380.
- OKUMA, D.M.; CUENCA, A.; NAUEN, R.; OMOTO, C. Large-scale monitoring of the frequency of ryanodine receptor target-site mutations conferring diamide resistance in brazilian field populations of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). **Insects**, v.13, p.626, 2022. DOI: 10.3390/insects13070626.
- OLIVEIRA, A.P.; SANTANA, A.S.; SANTANA, E.D.R.; LIMA, A.P.S.; FARO, R.R.N.; NUNES, R.S.; LIMA, A.D.; BLANK, A.F.; ARAÚJO, A.P.A.; CRISTALDO, P.F.; BACCI, L. Nanoformulation prototype of the essential oil of *Lippia sidoides* and thymol to population management of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Industrial Crops and Products**, v.107, p.198–205, 2017a. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.05.046.
- OLIVEIRA, B.; MELO, C.; ALVES, P.; SANTOS, A.; SANTOS, A.; SANTANA, A.; ARAÚJO, A.; NASCIMENTO, P.; BLANK, A.; BACCI, L. Essential oil of *Aristolochia trilobata*: synthesis, routes of exposure, acute toxicity, binary mixtures and behavioral effects on leaf-cutting ants. **Molecules**, v.22, p.335, 2017b. DOI: 10.3390/molecules22030335.
- OLIVEIRA, A.P.; SANTOS, A.A.; SANTANA, A.S.; LIMA, A.P.S.; MELO, C.R.; SANTANA, E.D.R.; SAMPAIO, T.S.; BLANK, A.F.; ARAÚJO, A.P.A.; CRISTALDO, P.F.; BACCI, L. Essential oil of *Lippia sidoides* and its major compound thymol: Toxicity and walking response of populations of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Crop Protection**, v.112, p.33–38, 2018. DOI: 10.1016/j.cropro.2018.05.011.
- PAREDES-SÁNCHEZ, F.A.; RIVERA, G.; BOCANEGRA-GARCÍA, V.; MARTÍNEZ-PADRÓN, H.Y.; BERRONES-MORALES, M.; NIÑO-GARCÍA, N.; HERRERA-MAYORGA, V. Advances in control strategies against *Spodoptera frugiperda*. A review. **Molecules**, v.26, p.5587, 2021. DOI: 10.3390/molecules26185587.
- PAVELA, R. Acute toxicity and synergistic and antagonistic effects of the aromatic compounds of some essential oils against *Culex quinquefasciatus* Say larvae. **Parasitology Research**, v.114, p.3835–3853, 2015. DOI: 10.1007/s00436-015-4614-9.
- PAVELA, R.; BENELLI, G. Essential Oils as Ecofriendly Biopesticides? Challenges and Constraints. **Trends in Plant Science**, v.21, p.1000–1007, 2016. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.10.005.
- PAZINI, J.B.; GRÜTZMACHER, A.D.; MARTINS, J.F.S.; PASINI, R.A.; RAKES, M. Selectivity of pesticides used in rice crop on *Telenomus podisi* and *Trichogramma pretiosum*.

- Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.46, p.327–335, 2016. DOI: 10.1590/1983-40632016v4640844.
- POSOS-PARRA, O.; MOTA-SANCHEZ, D.; PITTENDRIGH, B.R.; WISE, J.C.; DIFONZO, C.D.; PATTERSON, E. Characterization of the inheritance of field-evolved resistance to diamides in the fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) (Lepidoptera: Noctuidae) population from Puerto Rico. **PLOS ONE**, v.19, p.e0295928, 2024a. DOI: 10.1371/journal.pone.0295928.
- POSOS-PARRA, O.A.; PITTENDRIGH, B.R.; WISE, J.C.; DIFONZO, C.; PATTERSON, E.; MOTA-SANCHEZ, D. Inheritance and resistance mechanisms of field-evolved resistance to pyrethroids in a fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) strain from Puerto Rico. **Insects**, v.15, p.912, 2024b. DOI: 10.3390/insects15120912.
- RATTAN, R.S. Mechanism of action of insecticidal secondary metabolites of plant origin. **Crop Protection**, v.29, p.913–920, 2010. DOI: 10.1016/j.cropro.2010.05.008.
- REGNAULT-ROGER, C.; VINCENT, C.; ARNASON, J.T. Essential oils in insect control: Low-risk products in a high-stakes World. **Annual Review of Entomology**, v.57, p.405–424, 2012. DOI: 10.1146/annurev-ento-120710-100554.
- RIBEIRO, B.M.; GUEDES, R.N.C.; OLIVEIRA, E.E.; SANTOS, J.P. Insecticide resistance and synergism in brazilian populations of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Stored Products Research**, v.39, p.21–31, 2003. DOI: 10.1016/S0022-474X(02)00014-0.
- RUTTANAPHAN, T.; BULLANGPOTI, V. The potential use of thymol and (R)-(+)-pulegone as detoxifying enzyme inhibitors against *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Phytoparasitica*, v. 50, n. 4, p. 913–920, 2 set. 2022.
- SANTOS, N.C.; SILVA, J.E.; SANTOS, A.C.C.; DANTAS, J.O.; TAVARES, S.R.S.A.; ANDRADE, V.S.; OLIVEIRA, S.D.S.; BLANK, A.F.; ARAÚJO, A.P.A.; BACCI, L. Bioactivity of essential oils from, *Croton grewioides* and its major compounds: toxicity to soybean looper *Chrysodeixis includens* and selectivity to the predatory stink bug *Podisus nigrispinus*. **Environmental Science and Pollution Research**, v.30, p.18798–18809, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-23414-w.
- SARAIVA, A.G.Q.; SARAIVA, G.D.; ALBUQUERQUE, R.L.; NOGUEIRA, C.E.S.; TEIXEIRA, A.M.R.; LIMA, L.B.; CRUZ, B.G.; SOUSA, F.F. Chemical analysis and vibrational spectroscopy study of essential oils from *Lippia sidoides* and of its major constituent. **Vibrational Spectroscopy**, v.110, p.103111, 2020. DOI: 10.1016/j.vibspec.2020.103111.
- SAS INSTITUTE. **SAS Statistical Analysis Systems Institute**. Versão 9.1, SAS Institute Inc., Cary, Carolina do Norte, EUA, 2008.
- SIDDIQUI, J.A.; FAN, R.; NAZ, H.; BAMISILE, B.S.; HAFEEZ, M.; GHANI, M.I.; WEI, Y.; XU, Y.; CHEN, X. Insights into insecticide-resistance mechanisms in invasive species: Challenges and control strategies. **Frontiers in Physiology**, v.13, 2023. DOI: 10.3389/fphys.2022.1112278.

- SILVA, S.M.; CUNHA, J.P.A.R.; CARVALHO, S.M.; ZANDONADI, C.H.S.; MARTINS, R.C.; CHANG, R. *Ocimum basilicum* essential oil combined with deltamethrin to improve the management of *Spodoptera frugiperda*. **Ciência e Agrotecnologia**, v.41, p.665–675, 2017. DOI: 10.1590/1413-70542017416016317.
- SODERLUND, D. M. Toxicology and Mode of Action of Pyrethroid Insecticides. *Em: Hayes' Handbook of Pesticide Toxicology*. Elsevier, 2010. p. 1665–1686.
- SPARKS, T.C.; NAUEN, R. IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.121, p.122–128, 2015. DOI: 10.1016/j.pestbp.2014.11.014.
- TAK, J.-H.; ISMAN, M. B. 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*, v. 101, p. 29–35, jul. 2017.
- TAY, W.T.; KUNIATA, L.; JAMES, W.; WALSH, T. Confirmation of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Papua New Guinea by molecular diagnostics of mitochondrial DNA COI gene. **BioInvasions Records**, v.12, p.103–116, 2023. DOI: 10.3391/bir.2023.12.1.09.
- TEIXEIRA, L.A.; ANDALORO, J.T. Diamide insecticides: Global efforts to address insect resistance stewardship challenges. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.106, p.76–78, 2013. DOI: 10.1016/j.pestbp.2013.01.010.
- TONG, F.; COATS, J. R. Quantitative structure–activity relationships of monoterpenoid binding activities to the housefly GABA receptor. *Pest Management Science*, v. 68, n. 8, p. 1122–1129, 28 ago. 2012.
- TUDI, M.; RUAN, H.D.; WANG, L.; LYU, J.; SADLER, R.; CONNELL, D.; CHU, C.; PHUNG, D.T. Agriculture development, pesticide application and Its impact on the environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.18, p.1112, 2021. DOI: 10.3390/ijerph18031112.
- VENTURA, A.S.; SILVA, T.S.C.; CARDOSO, C.A.L.; INOUE, L.A.K.A. Características do anestésico alternativo de erva cidreira (*Lippia alba*) e alecrim pimenta (*Lippia sidoides*) em peixes. **Medicina Veterinária (UFRPE)**, v.13, p.416, 2019. DOI: 10.26605/medvet-v13n3-3304.
- WINK, F.; GARLET, J.; FUZINATTO, L.P.O.; ALVES, U.S. Toxicidade de diferentes extratos de *Apeiba tibourbou* em *Spodoptera frugiperda*. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v.16, p.e6152, 2024. DOI: 10.55905/cuadv16n10-193.
- YU, S.J.; NGUYEN, S.N. Inheritance of Carbaryl Resistance and Microsomal Oxidases in the Fall Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of Economic Entomology**, v.87, p.301–304, 1994. DOI: 10.1093/jee/87.2.301.
- YU, S.J.; NGUYEN, S.N.; ABO-ELGHAR, G.E. Biochemical characteristics of insecticide resistance in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith). **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.77, p.1–11, 2003. DOI: 10.1016/S0048-3575(03)00079-8.

971 ZHANG, Z.; SUN, X.; XIN, Z.; LUO, Z.; GAO, Y.; BIAN, L.; CHEN, Z. Identification and
972 field evaluation of non-host volatiles disturbing host location by the tea geometrid, *Ectropis*
973 *obliqua*. **Journal of Chemical Ecology**, v.39, p.1284–1296, 2013. DOI: 10.1007/s10886-
974 013-0344-6.

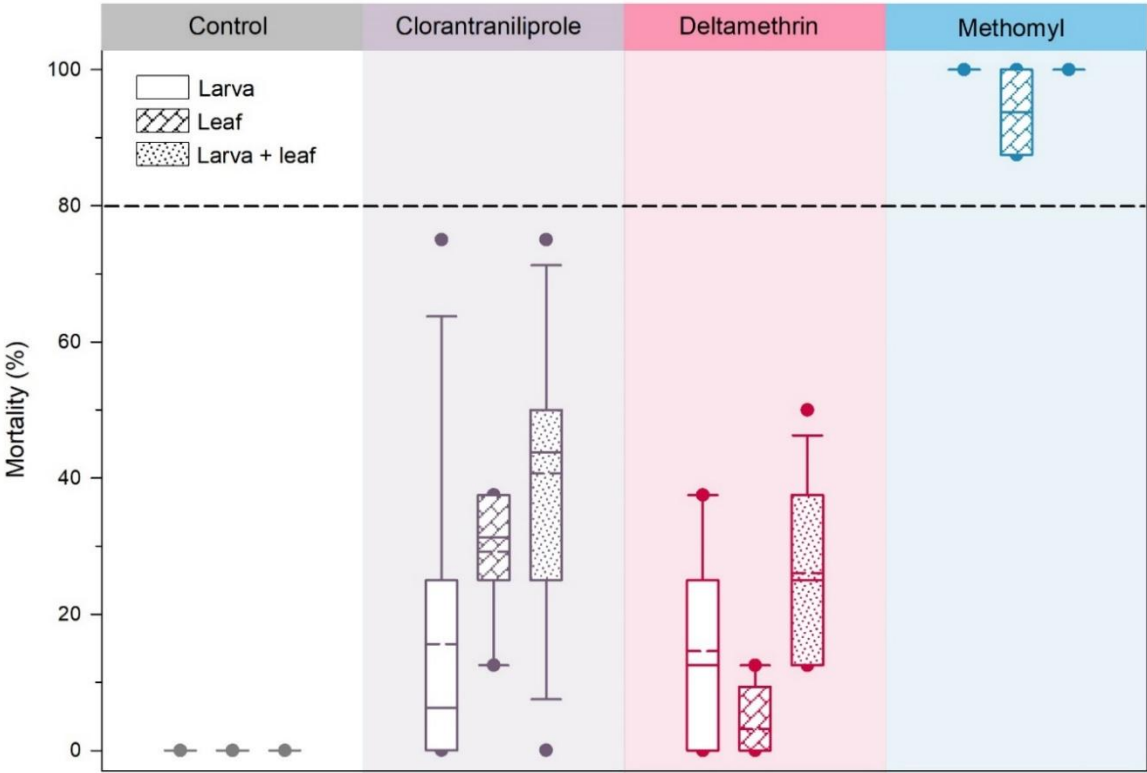


Figura 1. Mortalidade de larvas de terceiro ínstar de *Spodoptera frugiperda* após 72 horas de exposição às doses recomendadas dos inseticidas cloranthraniliprole, deltametrina e metomil aplicados com torre de Potter em larvas (exposição por contato direto), em folhas de milho (exposição por contato residual + ingestão) e em larvas e folhas de milho (exposição por contato direto + contato residual + ingestão). As linhas tracejadas e contínuas dentro dos boxplots representam a média e a mediana, respectivamente. As extremidades da caixa representam os percentis 25 e 75, as linhas do erro correspondem aos percentis 10 e 90 e os círculos representam os percentis 5 e 95. A linha tracejada representa o limiar mínimo de eficiência exigido para o inseticida, segundo os critérios de registro de inseticidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA).

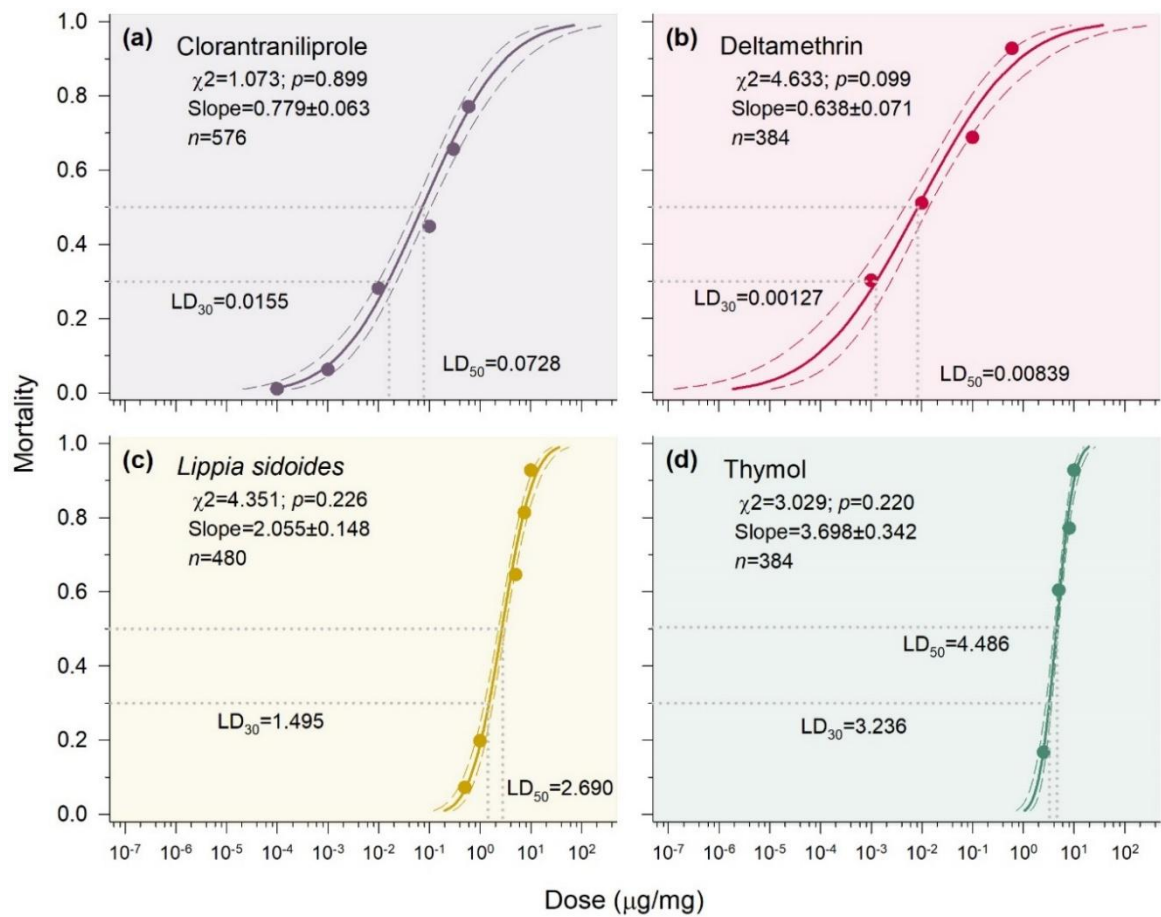


Figura 2. Curvas de dose-mortalidade de larvas de terceiro ínstar de *Spodoptera frugiperda* após 72 horas de exposição aos inseticidas convencionais cloranthraniliprole (a) e deltametrina (b) e aos inseticidas botânicos óleo essencial de *Lippia sidoides* (c) e timol (d) aplicados topicamente com o auxílio de uma microseringa. As linhas tracejadas indicam os intervalos de confiança de 95% e os círculos as médias das mortalidades observados nos experimentos.

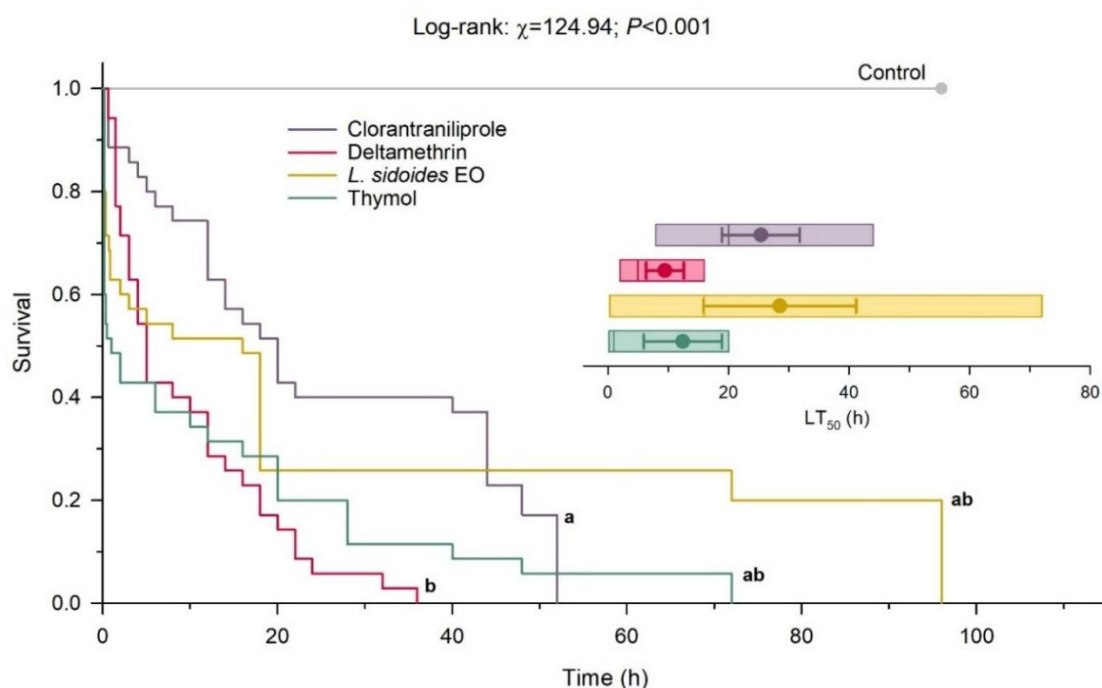


Figura 3. Curvas de sobrevivência e tempo letal (TL₅₀) (média $\pm$ IC_{95%}) de larvas de terceiro ínstar de *Spodoptera frugiperda* após 72 horas de exposição as DL₉₀ dos inseticidas convencionais cloranthraniliprole e deltametrina e dos inseticidas botânicos óleo essencial de *Lippia sidoides* e timol aplicados topicamente com o auxílio de uma microseringa. TL₅₀ = tempo letal necessário para matar 50% da população. Curvas de sobrevivência seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo método de Holm-Sidak. As extremidades das caixas representam os percentis 25 e 75% e a linha dentro da caixa a mediana. Os círculos representam a média e as linhas do erro o intervalo de confiança a 95%.

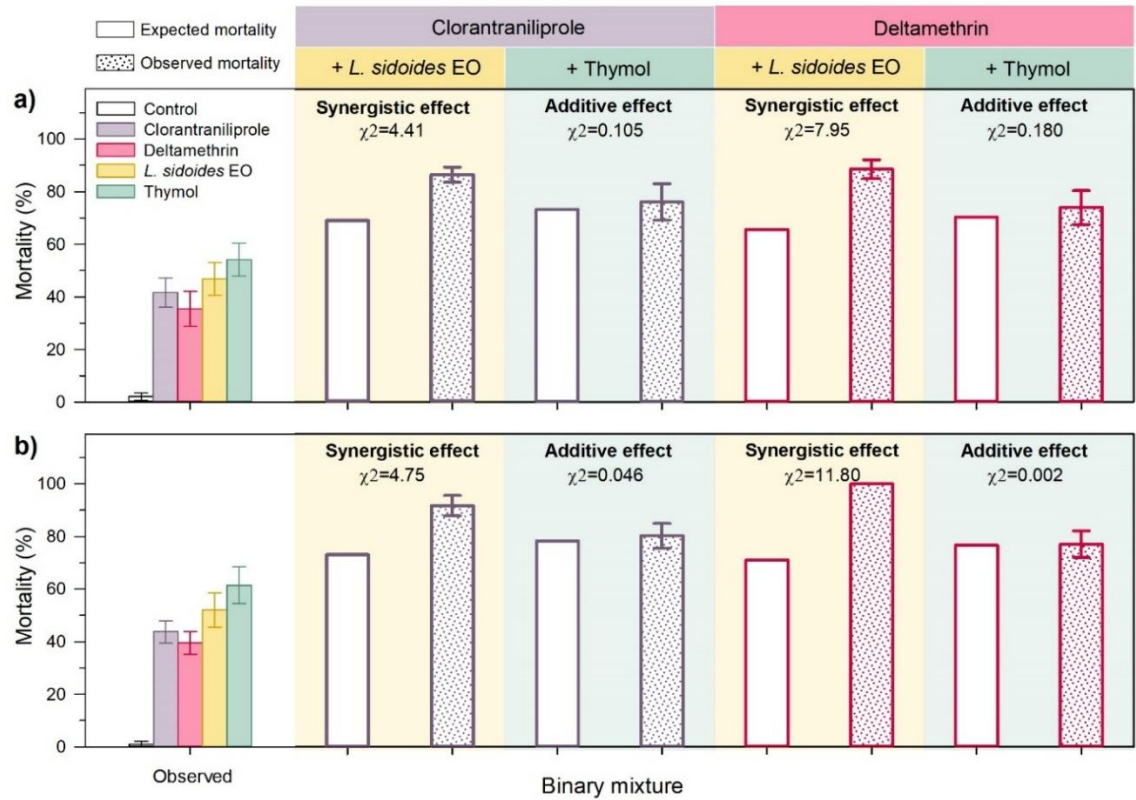


Figura 4. Mortalidade observada de larvas de terceiro ínstar de *Spodoptera frugiperda* após 72 h de exposição tópica aos inseticidas convencionais (clorrantraniliprole e deltametrina) e aos inseticidas botânicos (óleo essencial de *Lippia sidoides* e timol) e mortalidades esperadas e observadas de suas misturas binárias nas doses correspondentes ao limite inferior **(a)** e superior **(b)** do intervalo de confiança da DL_{50} de cada inseticida determinadas nos bioensaios de toxicidade. Clorrantraniliprole ($IC_{95\%}$ = 0,0507-0,107 $\mu\text{g}/\text{mg}$), deltametrina ($IC_{95\%}$ = 0,00466-0,0139 $\mu\text{g}/\text{mg}$), óleo essencial de *Lippia sidoides* ($IC_{95\%}$ = 2,29-3,13 $\mu\text{g}/\text{mg}$) e timol ($IC_{95\%}$ = 4,04-4,92 $\mu\text{g}/\text{mg}$). χ^2 tabelado = 3,84. χ^2 calculado > tabelado = sinergismo, χ^2 calculado < tabelado = aditismo.

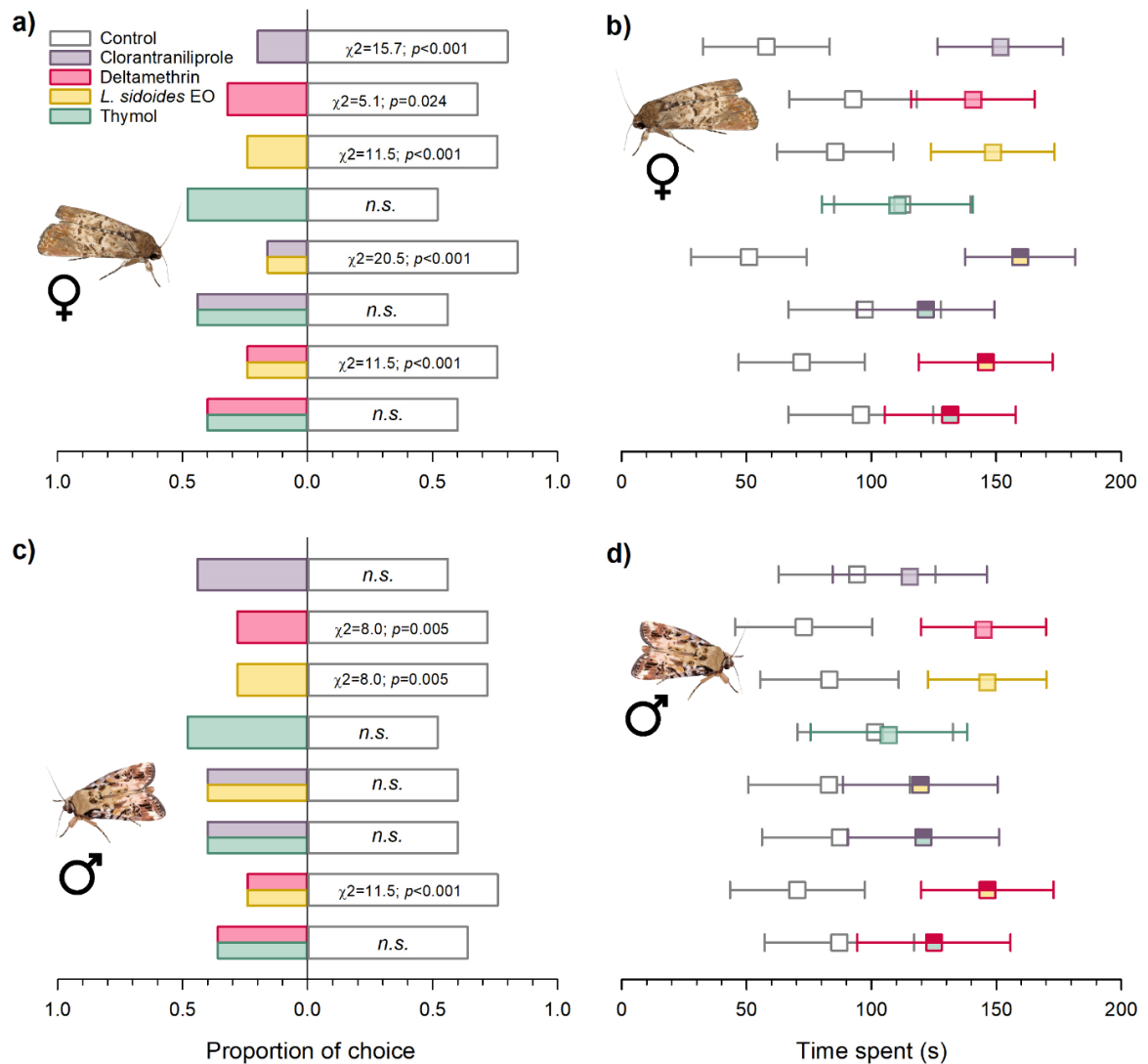


Figura. 5. Resposta olfativa de fêmeas (a, b) e machos (c, d) de *Spodoptera frugiperda* expostos aos odores dos inseticidas convencionais (cloranthraniliprole e deltametrina), inseticidas botânicos (óleo essencial de *Lippia sidoides* e timol) e suas misturas binárias. Os experimentos foram conduzidos em um olfatômetro de tubo Y (diâmetro de 2,2 cm, comprimento de 10 cm e ângulo de 75°). Para o controle dos experimentos, foram utilizadas folhas de milho e fêmeas virgens em maturidade sexual para as fêmeas e machos, respectivamente. A diferença na proporção de escolha foi analisada por meio do teste de qui-quadrado ($p < 0,05$), e os histogramas em duas cores representam as misturas binárias. O tempo gasto (s) indica o período necessário para que 50% dos adultos escolhessem um dos lados do olfatômetro. As barras de erro representam os intervalos de confiança a 95% de probabilidade e os quadrados as médias observadas nos experimentos.

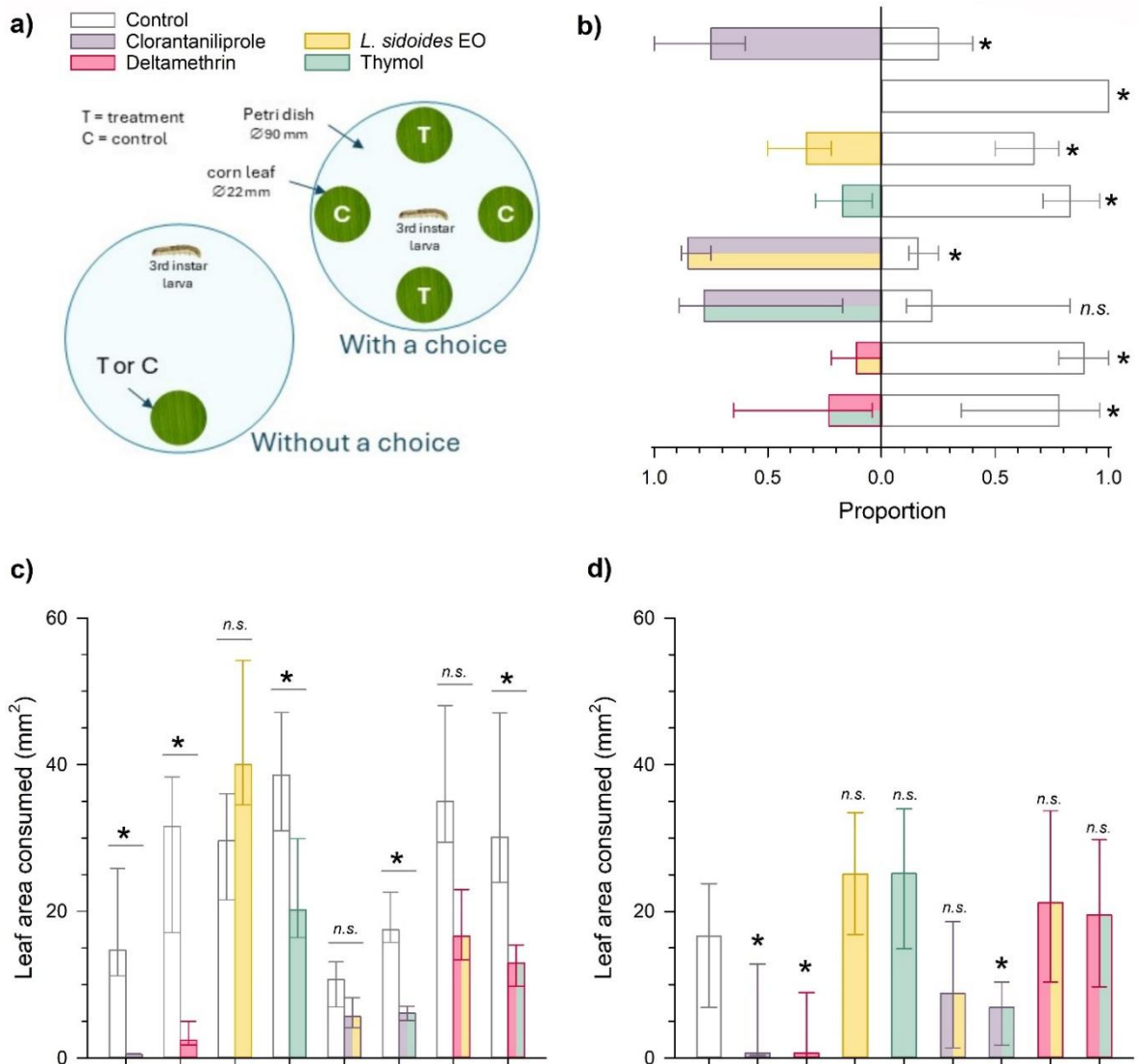


Figura 6. Preferência **(b)** e consumo foliar **(c, d)** de larvas de terceiro ínstar de *Spodoptera frugiperda*, em arenas de 9 cm de diâmetro contendo folhas tratadas e não tratadas. **(a)** Legenda e esquema do bioensaio com e sem chance de escolha. **(b)** A diferença na proporção de escolha foi analisada com o teste de Mann-Whitney, com a mediana representada no histograma e os percentis de 40 e 60% indicados pelas linhas de erro. **(c)** Consumo foliar no bioensaio com possibilidade de escolha, analisado com o teste de Mann-Whitney. O histograma mostra a mediana e as linhas de erro indicam os percentis 40 e 60%. **(d)** Consumo foliar no bioensaio sem possibilidade de escolha, analisado com o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn's, comparando os tratamentos com o controle. As medianas estão representadas nos histogramas, com linhas de erro indicando os percentis 40 e 60%. Os histogramas em duas cores representam as misturas binárias. Os histogramas com asterisco indicam diferenças significativas na escolha das larvas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa evidenciam o potencial da combinação dos inseticidas convencionais clorantraniliprole e deltametrina com o óleo essencial de *L. sidoides*, tanto na letalidade de *S. frugiperda* quanto na alteração do seu comportamento. A associação desses compostos resultou em efeitos sinérgicos, ou seja, a mistura potencializou a ação dos inseticidas sobre *S. frugiperda*. Esses resultados sugerem que essa estratégia pode representar uma alternativa viável e ambientalmente mais segura para o controle da lagarta-do-cartucho, além de contribuir para o manejo da resistência dessa praga aos inseticidas convencionais avaliados neste estudo.