



BLANDER YOBERSON MAMANI YABAR

**PREFERÊNCIA DE *Chrysoperla externa* POR VOLÁTEIS
CONSTITUTIVOS E INDUZIDOS PELA HERBIVORIA DE
Leucoptera coffeella EM CAFÉ (*Coffea arabica*)**

**LAVRAS-MG
2024**

BLANDER YOBERTSON MAMANI YABAR

**PREFERÊNCIA DE *Chrysoperla externa* POR VOLÁTEIS CONSTITUTIVOS E
INDUZIDOS PELA HERBIVORIA DE *Leucoptera coffeella* EM CAFÉ (*Coffea arabica*)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Entomologia, área de concentração em Entomologia, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Brígida de Souza
Orientadora

Profa. Dra. Maria Fernanda Gomez Villalba Peñaflor
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Mamani Yabar, Blander Yoberson.

Preferência de *Chrysoperla externa* por voláteis constitutivos e induzidos pela herbivoria de *Leucoptera coffeella* em café (*Coffea arabica*) / Blander Yoberson Mamani Yabar. - 2024.

62 p.

Orientador(a): Brígida de Souza.

Coorientador(a): Maria Fernanda Gomez Villalba Peñafior.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. controle biológico. 2. crisopídeos. 3. agroecossistemas. I. de Souza, Brígida. II. Gomez Villalba Peñafior, Maria Fernanda. III. Título.

BLANDER YOBERTSON MAMANI YABAR

**PREFERÊNCIA DE *Chrysoperla externa* POR VOLÁTEIS CONSTITUTIVOS E
INDUZIDOS PELA HERBIVORIA DE *Leucoptera coffeella* EM CAFÉ (*Coffea arabica*)**

**PREFERENCE OF *Chrysoperla externa* FOR CONSTITUTIVE AND HERBIVORY-
INDUCED VOLATILES OF *Leucoptera coffeella* IN COFFEE (*Coffea arabica*)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Entomologia, área de concentração em Entomologia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 21 de junho de 2024.

Dra Brígida de Souza - UFLA

Dra Rosangela Cristina Marucci - UFLA

Dr. Carlos Eduardo de Souza Bezerra - UNIVAG

Profa. Dra. Brígida de Souza
Orientadora

Profa. Dra. Maria Fernanda Gomez Villalba Peñaflor
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2024**

*À minha mãe Pastora e meu pai Alejandro pelo
apoio incondicional e muito amor.
Ao meu irmão Edbert por me motivar a cumprir
meus sonhos
À minha amada Milagros, por me motivar a estudar
na minha pós-graduação
Dedico*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me cuidado, dado saúde e força.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Entomologia (DEN), pela oportunidade de estudar e contribuir em minha formação profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos meus pais, Alejandro e Pastora, e meu irmão Edbert Fredy, minha gratidão por me apoiarem incondicionalmente e por me motivarem a cumprir meus sonhos.

A minha amada Milagros, por ser meu suporte, por sua confiança, paciência, por me motivar a realizar meus sonhos e por todo o seu amor.

À Profa Dra Brígida Souza, pela orientação, amizade, motivação e por todo ensinamento e muita paciência.

À Profa Dra Maria Fernanda G. Villalba Peñaflor, por toda ajuda fornecida nesta etapa da minha formação profissional.

Aos meus colegas dos laboratórios, LCBE e LEQIIP, e de todo o Departamento, pelo apoio, ensinamentos e risadas.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram com a minha formação.

RESUMO

As plantas desenvolveram uma variedade de mecanismos de defesa contra os herbívoros, incluindo a produção de compostos químicos que afetam diretamente os artrópodes herbívoros e o recrutamento indireto de inimigos naturais mediados pelos Voláteis Induzidos pela Herbivoria das Plantas (HIPVs). O cafeeiro *Coffea arabica*, uma das culturas mais importantes no Brasil, sofre limitações de produtividade devido à incidência de pragas de importância econômica, como *Leucoptera coffeella*, com ocorrência prevalente em climas tropicais. A predação por inimigos naturais, como *Chrysoperla externa*, é comum em culturas de café, mas, pouco se conhece sobre suas interações tróficas nos agroecossistemas cafeeiros. Neste contexto, o objetivo foi avaliar a preferência de *C. externa* por voláteis constitutivos e induzidos pela herbivoria de *L. coffeella* em plantas de café. Foram realizados testes com chance de escolha para avaliar a preferência das larvas por plantas infestadas ou não infestadas e a preferência para oviposição pelos adultos desse crisopídeo. Além disso, utilizando-se o olfatômetro Y, avaliou-se a preferência olfativa, tanto das larvas quanto dos adultos, aos voláteis de plantas de café infestadas e não infestadas por *L. coffeella*. As larvas de *C. externa* mostraram preferência pelas plantas infestadas em relação àquelas não infestadas. No entanto, os adultos não demonstraram uma preferência clara para oviposição entre plantas infestadas e não infestadas. Nos ensaios de olfatometria, tanto larvas quanto os adultos mostraram preferência olfativa por HIPVs comparados com diferentes combinações, incluindo plantas não infestadas e o ar limpo. Os resultados indicam que a manipulação de HIPVs pode ser uma estratégia importante para atrair inimigos naturais para os cultivos de café, contribuindo para o desenvolvimento de diferentes estratégias de controle de pragas. Recomenda-se que futuras pesquisas explorem as interações com herbivoria múltipla em café e seus efeitos na interação com os inimigos naturais, visando potencializar o controle biológico.

Palavras-chave: controle biológico; crisopídeos; agroecossistemas; voláteis induzidos por herbivoria das plantas.

ABSTRACT

Plants have developed a variety of defense mechanisms against herbivores, including the production of chemical compounds that directly affect herbivorous arthropods and the indirect recruitment of natural enemies mediated by Herbivore-Induced Plant Volatiles (HIPVs). Coffee plant *Coffea arabica*, one of the most important crops in Brazil, suffers from productivity limitations due to the incidence of economically significant pests, such as *Leucoptera coffeella*, which is prevalent in tropical climates. Predation by natural enemies, such as *Chrysoperla externa*, is common in coffee crops, but little is known about their trophic interactions in coffee agroecosystems. In this context, the objective was to evaluate the preference of *C. externa* for constitutive and herbivory-induced volatiles from *L. coffeella* in coffee plants. Choice tests were conducted to evaluate the preference of larvae for infested or non-infested plants and the oviposition preference of adults of this chrysopid. Additionally, using a Y-tube olfactometer, the olfactory preference of both larvae and adults to volatiles from *L. coffeella* infested and non-infested coffee plants was evaluated. *C. externa* larvae showed a preference for infested plants over non-infested ones. However, adults did not show a clear preference for oviposition between infested and non-infested plants. In the olfactometry assays, both larvae and adults showed an olfactory preference for HIPVs compared to different combinations, including non-infested plants and clean air. The results indicate that the manipulation of HIPVs can be an important strategy to attract natural enemies to coffee crops, contributing to the development of different pest control strategies. Future research is recommended to explore interactions with multiple herbivory in coffee and their effects on interactions with natural enemies, aiming to enhance biological control.

Keywords: biological control; chrysopids; agroecosystems; herbivore-induced plant volatiles.

INDICADORES DE IMPACTO

O crisopídeo *Chrysoperla externa* é um inseto predador quando na fase larval e pode se alimentar de ampla diversidade de presas, muitas das quais atingem o status de praga. A pesquisa sobre a preferência das larvas de *C. externa* por voláteis constitutivos e induzidos pela herbivoria por *Leucoptera coffeella* em plantas de café apresenta impactos sob diferentes perspectivas. Do ponto de vista social, a pesquisa tem o potencial de melhorar a vida dos agricultores ao oferecer uma abordagem sustentável para o manejo da praga, reduzindo a dependência de pesticidas químicos e, conseqüentemente, promovendo a saúde e a segurança alimentar. Tecnicamente, a identificação dos compostos voláteis que atraem tanto as larvas quanto os adultos de *C. externa* pode levar ao desenvolvimento de compostos atrativos sintéticos que poderão ser utilizadas para manipular o comportamento desse predador, aumentando a eficiência do controle biológico. Economicamente, a adoção de estratégias de Manejo Integrado de Pragas (MIP) baseadas nos resultados da pesquisa podem reduzir os custos do controle da praga e aumentar a produtividade dos cultivos de café, beneficiando diretamente os cafeicultores e, indiretamente, a economia local e nacional. Culturalmente, a valorização de práticas agrícolas sustentáveis e ecologicamente amigáveis podem fortalecer a imagem do café brasileiro no mercado internacional, onde há uma crescente demanda por produtos derivados de cultivos com bases ecológicas. A pesquisa também pode incentivar a preservação da biodiversidade local ao promover o uso de predadores naturais no controle de pragas, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável. Esses impactos beneficiam tanto os agricultores quanto os consumidores finais, contribuindo para práticas agrícolas sustentáveis.

IMPACT INDICATORS

The lacewing *Chrysoperla externa* is a predatory insect when in the larval stage and can feed on a wide range of prey, many of which reach pest status. The research on the preference of *C. externa* larvae for constitutive and herbivore-induced plant volatiles (HIPVs) from *Leucoptera coffeella* in coffee plants presents impacts from various perspectives. From a social standpoint, this research has the potential to improve the lives of farmers by offering a sustainable approach to pest management, reducing dependence on chemical pesticides, and consequently promoting health and food safety. Technologically, identifying the volatiles that attract both larvae and adults can lead to the development of synthetic attractants that can be used to manipulate the behavior of these predators, thereby increasing the efficiency of biological control. Economically, the adoption of Integrated Pest Management (IPM) strategies based on the research findings can reduce pesticide costs and increase agricultural productivity, directly benefiting coffee growers and indirectly supporting the local and national economy. Culturally, the emphasis on sustainable and eco-friendly agricultural practices can enhance the global image of Brazilian coffee, especially in markets with a growing demand for environmentally responsible products. The research also promotes local biodiversity conservation by encouraging the use of natural predators in pest control, aligning with sustainable development goals. These impacts benefit both farmers and end consumers, contributing to sustainable agricultural practices.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Escolha feita por larvas de segundo instar de *Chrysoperla externa* entre plantas de café infestadas e não infestadas por 39
- Figura 2 – Esquema do teste da escolha de larvas e adultos de *Chrysoperla externa* entre diferentes combinações de plantas de café em olfatômetro.....42
- Figura 3 - Preferência de larvas de segundo instar de *Chrysoperla externa* por plantas de café com infestação e sem infestação por *Leucoptera coffeella*.43
- Figura 4 - Resposta olfativa de larvas de segundo instar de *Chrysoperla externa*: Plantas de café infestadas vs. não infestadas por *Leucoptera coffeella*, plantas com infestação vs. ar limpo, e planta sem infestação vs. ar limpo; e proporção de repetições “sem resposta”47
- Figura 5 - Resposta olfativa de fêmeas de *Chrysoperla externa* em relação à plantas de café infestadas e não infestadas pelo bicho-mineiro, plantas infestadas vs. ar limpo, e planta não infestada vs. ar limpo; e proporção de repetições “sem resposta”.50

LISTA DE SIGLAS

AA	Ácido Acético
CB	Controle Biológico
CBC	Controle Biológico Conservativo
DAMPs	Padrões Moleculares Associados a Danos
DEN	Departamento de Entomologia
ESAL	Escola de Ciências Agrárias de Lavras
HAMPs	Padrões Moleculares Associados a Herbívoros
HIPV	Voláteis Induzidos pela Herbivoria das Plantas
LCBE	Laboratório de Controle Biológico com Entomófagos
LEQIIP	Laboratório de Ecologia Química e Interação Inseto-Planta
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1 INTRODUÇÃO GERAL	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Defesa de plantas mediadas por substâncias químicas	15
2.2 A cultura de cafeeiro	17
2.3 <i>Leucoptera coffeella</i>	18
2.4 <i>Chrysoperla externa</i>	19
2.5 Controle biológico.....	21
REFERÊNCIAS	23
SEGUNDA PARTE	33
CAPITULO I	33
RESUMO.....	33
1 INTRODUÇÃO	34
2 MATERIAL E MÉTODOS	37
2.1 Local da pesquisa.....	37
2.2 Obtenção e cultivo de <i>Coffea arabica</i>	37
2.3 Criação de <i>Leucoptera coffeella</i>	37
2.4 Criação de <i>Chrysoperla externa</i>	37
2.5 Indução das plantas de café à herbivoria por <i>L. coffeella</i>	38
2.6 Ensaio I: Escolha de <i>Chrysoperla externa</i> entre plantas infestadas e não infestadas	38
2.7 Ensaios II: Resposta olfativa de larvas e adultos de <i>Chrysoperla externa</i> aos voláteis de plantas induzidos pela herbivoria por <i>Leucoptera coffeella</i>	40
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
3.1 Ensaio I: Escolha de <i>Chrysoperla externa</i> entre plantas infestadas e não infestadas	43
3.2 Ensaios II: Resposta olfativa de larvas e adultos de <i>Chrysoperla externa</i> aos voláteis de plantas induzidos por <i>Leucoptera coffeella</i>	46
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
5 CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS	55

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cultura do café *Coffea arabica*, é explorada em mais de 60 países e envolve cerca de 25 milhões de produtores (Dantas *et al.*, 2021) . Trata-se de uma das commodities agrícolas mais importantes do mundo (Krishnan *et al.*, 2021). No território brasileiro, a produção de café tornou-se uma das atividades agrícolas mais tradicionais (Santos *et al.*, 2023). Sua produtividade atende à demanda do mercado mundial (Peruzzolo; Cruz; Ronqui, 2019).

No Brasil, a produção de café na safra 2022 - 2023 foi de 55 milhões de sacas beneficiadas. Dentre os estados produtores, destaca-se Minas Gerais, responsável por uma produção de 29 milhões de sacas, o que evidencia a importância da cafeicultura nessa região (CONAB, 2024), consolidando-se como um dos principais pilares da indústria cafeeira (Matos *et al.*, 2019). No entanto, existem fatores bióticos e abióticos que influenciam a produtividade do café (Tomazella *et al.*, 2018), os quais podem causar perdas econômicas substanciais e dificultar a segurança alimentar em diferentes níveis sociais (Savary *et al.*, 2019). Estima-se que os artrópodes-praga causam perdas diretas e indiretas da ordem de 7,7% da produção agrícola brasileira, valorizadas em US\$ 17,7 bilhões anualmente (Oliveira *et al.*, 2014).

O uso de pesticidas convencionais tornou-se uma das estratégias mais utilizadas para o controle de pragas do café (Queiroz *et al.*, 2018; Venzon, 2021), sendo majoritariamente utilizados contra o bicho-mineiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville & Perrottet) (Lepidoptera: Lyonetiidae), uma das pragas mais comuns em cultivos de café em regiões tropicais (Silva *et al.*, 2024). Entretanto, o uso sequencial de pesticidas pode acarretar diversos problemas, como desequilíbrios ambientais, riscos para a saúde humana, redução de espécies não alvo, bem como a possibilidade de seleção de populações resistentes, o que implica na redução da eficiência do controle (Khan *et al.*, 2023; Leite *et al.*, 2020a; Reis *et al.*, 2015; Rodrigues-Silva *et al.*, 2017; Tudi *et al.*, 2021)

O bicho-mineiro é uma das pragas-chave da cultura do café no Brasil (Pantoja-Gomez *et al.*, 2019) sendo responsável por decréscimos significativos na produção (Custódio *et al.*, 2009; Vilela *et al.*, 2023). As larvas se alimentam das folhas, reduzindo a área fotossintética e afetando negativamente o desenvolvimento das plantas (Motta *et al.*, 2021; Ramírez-Valerio *et al.*, 2021). Os impactos negativos na produção podem atingir até 80% em áreas sem controle adequado (Scalon *et al.*, 2011).

O uso de pesticidas para o controle do bicho-mineiro continua sendo uma prática generalizada (Leite *et al.*, 2020b) e essa demanda aumenta substancialmente os custos da produção do café (Guerreiro Filho, 2006; Matiello *et al.*, 2015). Mesmo assim, a utilização de pesticidas persiste devido à falta de opções seguras, acessíveis e eficazes para o controle da praga (Wyckhuys *et al.*, 2013). Nesse contexto, é crucial o desenvolvimento de estratégias de controle que possibilitem um manejo sustentável (Dantas *et al.*, 2021) e que minimizem as perdas na produtividade (Baker; Green; Loker, 2020).

O Controle Biológico (CB) é uma opção diante do aumento da ocorrência do bicho-mineiro (Góngora *et al.*, 2023), além dos diversos casos de resistência dessa praga aos ingredientes ativos (Leite *et al.*, 2021). No entanto, esse tipo de controle enfrenta diversos desafios, especialmente quando se trata de cultivos a campo aberto, como, por exemplo, a dispersão de inimigos naturais para áreas vizinhas (Tooker; O'Neal; Rodriguez-Saona, 2020). Para enfrentar essas desvantagens, é fundamental o entendimento sobre o forrageamento dos inimigos naturais e o desenvolvimento de técnicas para manipular seu comportamento (Valle; Mujica; Gonzalez, 2023).

O comportamento de forrageamento dos inimigos naturais envolve a utilização de diversos estímulos que ajudam a detectar ou capturar suas presas ou hospedeiros (Lim; Ben-Yakir, 2020). Além disso, as plantas desenvolveram uma variedade de defesas químicas, conhecidos como Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), que atuam indiretamente na interação dos organismos em diferentes níveis tróficos (Rijk *et al.*, 2016; Mithöfer; Maffei, 2017; Picazo-Aragón; Terrab; Balao, 2020). Expressa-se a resposta da planta quando as pistas físicas e químicas derivadas da herbivoria remodelam seus transcriptomas, proteomas e metabolomas (Wu; Baldwin, 2010). A compreensão dos Compostos Orgânicos Voláteis Induzidos das Plantas (HIPVs) nas interações tritróficas proporciona o desenvolvimento de estratégias sustentáveis e eficientes (Ayelo *et al.*, 2021). No entanto, existem lacunas sobre como os inimigos naturais conseguem localizar o hospedeiro ou presa (Aartsma *et al.*, 2017).

Devido à adaptabilidade a diferentes condições geográficas (Morales; Lavagnini; Freitas, 2013) e aplicação em diversos programas de controle biológico de pragas no Brasil, utilizou-se o crisopídeo *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae), predador quando no estágio larval (Koczor; Szentkirályi; Tóth, 2019), para o desenvolvimento deste estudo. Este inseto possui uma ampla gama de presas, incluindo o bicho-mineiro do cafeeiro (Golmohammadi *et al.*, 2021; Martins Filho; Duarte; Venzon, 2023). Além disso, estudos relatam sobre sua atratividade dos crisopídeos frente aos voláteis das plantas de roseira (Salamanca *et al.*, 2015). No entanto, ainda são escassas as informações sobre a resposta de *C.*

externa aos voláteis induzidos pelo bicho-mineiro em plantas de café, o que ressalta a importância desta pesquisa. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a preferência de *C. externa* frente aos VOCs de plantas de café induzidos pela herbivoria de *L. coffeella*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Defesa de plantas mediadas por substâncias químicas

Diferentemente dos animais, as plantas não têm a capacidade de fugir de seus agressores, o que as levou a desenvolver estratégias diversificadas de defesas (Kessler, 2017). Por conseguinte, a herbivoria por insetos pode resultar em alterações no fenótipo químico das plantas (Dicke; van Loon; Soler, 2009) devido à contínua exposição à esses agentes estressores, bem como a microrganismos patogênicos, além de estresses abióticos (Pappas *et al.*, 2020).

As plantas desenvolveram um sistema imunológico sofisticado de percepção, reconhecimento e resposta aos invasores (Pieterse *et al.*, 2013), que envolve diferentes mecanismos morfológicos, bioquímicos e moleculares (War *et al.*, 2012). A defesa química baseia-se na síntese e acúmulo de compostos bioativos naturais, com efeitos repelentes ou atrativos para organismos de diferentes níveis tróficos (Mithöfer; Maffei, 2017; Mostafa *et al.*, 2022). Tais processos são reguladas por uma interação complexa entre estímulos endógenos e externos, e um subsequente “*crosstalk*” de vias de sinalização (Kessler, 2017). Além disso, a defesa química envolve a síntese de compostos tóxicos, como terpenoides, alcaloides, fenóis e outros (Rani; Sulakshana, 2017).

Os mecanismos de defesa das plantas podem atuar de forma direta e indireta (Mithöfer; Maffei, 2017). O mecanismo direto inclui características que aumentam a resistência da planta hospedeira, influenciando o comportamento e a fisiologia dos herbívoros (Aljbory; Chen, 2018). No entanto, o mecanismo indireto não tem um impacto evidente significativo sobre os herbívoros, mas pode recrutar inimigos naturais das pragas, incluindo predadores e parasitoides (Aljbory; Chen, 2018; Gatehouse, 2002).

As interações planta-herbívoro são complexas e envolvem redes de moléculas, sinais e estratégias para superar as respectivas defesas (Mostafa *et al.*, 2022; Santamaria *et al.*, 2013). As plantas desenvolveram estratégias fisiológicas adaptativas em resposta ao ataque dos herbívoros (Divekar *et al.*, 2022), as quais podem funcionar como defesas constitutivas ou induzidas em resposta a diferentes tipos de estresse (Mann *et al.*, 2021). Os mecanismos de defesa constitutiva envolvem características morfológicas da planta, como espinhos, pelos, tricomas e ceras superficiais, além de mecanismos bioquímicos de ação tóxica, antidigestivas e antinutritivas, independentemente da presença de herbívoros (Kessler, 2017; War *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2022). Por outro lado, os mecanismos induzidos envolvem a produção de compostos de defesa em resposta à herbivoria, liberando uma variedade de compostos orgânicos voláteis (Ito; Sakai, 2009; Sharifi; Lee; Ryu, 2018).

A percepção dos danos ocasionados às plantas ocorre através dos padrões moleculares associados a danos (DAMPs) e a herbívoros (HAMPs). A combinação desses padrões induz informações complexas codificadas para o reconhecimento do tipo de dano pela planta, o que permite a emissão de HIPVs (Duran-Flores; Heil, 2016; Meents; Mithöfer, 2020). Os HIPVs, além de atrair inimigos naturais, também alertam às plantas vizinhas sobre o perigo iminente (Kessler, 2017). Em alguns casos, os HIPVs emitidos pelas plantas podem ter caráter adaptativo, não adaptativo ou mal adaptativo, dependendo da percepção pelos organismos dos diferentes níveis tróficos (Takabayashi; Shiojiri, 2019). Portanto, a resposta da planta pode ser intra ou interespecífica, sendo dinâmica e heterogênea por natureza, influenciada pela concentração, composição química e elementos ambientais, que incluem os reagentes troposféricos (ozônio), temperatura, radiação e fluxo de ar, que podem influir no forrageamento pelo inimigo natural (Ali *et al.*, 2023; Meents; Mithöfer, 2020). Além disso, a quantidade e composição dos HIPVs podem ser influenciadas pela espécie do herbívoro, espécie ou genótipo da planta, estágio fenológico e condições ambientais onde as plantas cresceram, bem como pelo número de espécies herbívoras presentes (Arimura; Matsui; Takabayashi, 2009; Hare, 2011). No entanto, os efeitos dos fatores abióticos nas interações bióticas mediadas por HIPVs ainda tem sido pouco exploradas (Becker *et al.*, 2015).

Os HIPVs podem ser classificados como inespecíficos e específicos. Os específicos são aqueles induzidos apenas pela herbivoria, enquanto os inespecíficos incluem a herbivoria e os danos artificiais (Takabayashi; Shiojiri, 2019). Entre os inespecíficos encontram-se os Voláteis de Folhas Verdes (GLVs), sintetizados através de vias enzimáticas, como hidroperóxido e lipoxigenase, após a injúria dos tecidos decorrente do estresse biótico ou abiótico (Matsui; Engelberth, 2022; Takabayashi, 2022). Sua composição consiste em aldeídos de C6, como (*E*)-2-hexenal, (*Z*)-3-hexenal e *n*-hexanal, C6 – álcoois e seus ésteres (Hatanaka, 1993; Matsui, 2006).

Os HIPVs específicos são compostos por terpenos, como monoterpenos e sesquiterpenos, fenilpropanoides/benzenoides, além de derivados de ácidos graxos e aminoácidos (Dudareva *et al.*, 2006; Muhlemann; Klempien; Dudareva, 2014). Muitos desses VOCs são considerados como metabólitos secundários e desempenham múltiplas funções na defesa contra herbívoros (Guo *et al.*, 2024). Adicionalmente, os HIPVs podem influenciar várias vias hormonais, como o Ácido Jasmônico (JA), o Ácido Salicílico (SA), o Etileno (ET) e as Auxinas (IAA) e, às vezes, podem suprimir as defesas através do *crosstalk* hormonal negativo (Erb, 2018; Scala *et al.*, 2013).

Os terpenos são a mais diversa classe de voláteis, derivados de unidades de isopreno C₅ (Hu *et al.*, 2021). A classificação dos terpenoides inclui hemiterpenoides (C₅), monoterpenoides (C₁₀), homoterpenoides (C_{11,16}), sesquiterpenoides (C₁₅), diterpenoides (C₂₀), sesterpenoides (C₂₅), triterpenoides (C₃₀), tetraterpenoides (C₄₀) e politerpenoides (C_{>40}) (Boncan *et al.*, 2020). Os mono e sesquiterpenos são os compostos mais liberados nas interações planta – inseto, enquanto o isopreno é atribuído ao estresse abiótico (Rosenkranz *et al.*, 2021). Os terpenoides emitidos podem ter propriedades tóxicas, repelentes ou atraentes (Boncan *et al.*, 2020) e, em contraste com aqueles que visam diretamente pragas, também têm capacidade de atuar como eliciador de defesa vegetal (Cascone *et al.*, 2015). Os herbívoros mastigadores induzem maior quantidade de HIPVs como monoterpenos e GLVs, do que os herbívoros sugadores de seiva (Rowen; Kaplan, 2016).

Os fenilpropanoides e benzenoides constituem uma classe diversificada de metabólitos secundários originados dos fenilpropanoides (Liu; Osbourn; Ma, 2015). Inclui reações de hidroxilação e metilação que convertem o ácido cîâmico hidroxilado em uma série de ácidos hidroxiciâmicos, aldeídos e álcoois (Humphreys; Chapple, 2002). Envolve principalmente flavonoides, monolignóis, ácidos fenólicos, estilbenos e cumarinas (Deng; Lu, 2017). A biossíntese desses compostos ocorre através das vias do xiquimato e do acetato – malonato (Zagoskina *et al.*, 2023). Os flavonoides têm função de proteção contra estresses bióticos e abióticos, como ataque de herbívoros, nutrição deficiente e irradiação UV-B, secas e outras funções fisiológicas (Petruzza *et al.*, 2013).

Os ácidos graxos e seus derivados, como o (Z)-3-hexenol, as cetonas e o jasmonato de metila, têm origem de ácidos graxos insaturados, como ácido oleico (18:1), ácidos linoleicos (18:2) ou ácido α -linolênico (18:3) (Picazo-Aragón; Terrab; Balao, 2020). Os ácidos graxos, além de serem precursores biossintéticos de componentes cuticulares ou dos fitohormônios, como o ácido jasmônico, também têm impacto direto na indução de vários mecanismos de defesa das plantas (Kachroo; Kachroo, 2009). Entre os ácidos graxos, estão os Voláteis de Folhas Verdes, que são liberados rapidamente quando a planta é atacada por herbívoros (Scala *et al.*, 2013).

2.2 A cultura de cafeeiro

O café é uma cultura perene (Góngora *et al.*, 2023), presente em mais de 60 países, envolvendo cerca de 25 milhões de produtores (Dantas *et al.*, 2021). Trata-se de uma das commodities agrícolas mais importantes do mundo, com uma contribuição econômica

significativa para os países produtores (Krishnan *et al.*, 2021). No território brasileiro, a produção de café é uma das atividades agrícolas mais tradicionais, posicionando o país como o maior exportador de café do mundo (Santos *et al.*, 2019). Essa produção atende à demanda do mercado mundial (Peruzzolo; Cruz; Ronqui, 2019). No Brasil, a produção de café atingiu um total de 50,38 milhões de sacas em 2022. Dentre os estados produtores, destaca-se Minas Gerais, responsável pela produção de 22 milhões de sacas (CONAB, 2024), aproximadamente a metade da produção nacional, consolidando-se como um dos principais pilares da indústria cafeeira no país (Matos *et al.*, 2019).

A produtividade do café depende de fatores abióticos e bióticos (Tomazella *et al.*, 2018), uma vez que a cultura está sujeita a doenças e pragas que causam danos e prejuízos significativos tanto na produção quanto na qualidade do produto (Moura *et al.*, 2019). Como estratégia para o controle das pragas, tem sido observado o aumento na utilização de inseticidas sistêmicos convencionais nos últimos anos. No entanto, essas práticas podem acarretar riscos, incluindo a possibilidade de se tornarem ineficazes (Leite *et al.*, 2020a), resultando em um desequilíbrio no ambiente e na redução da presença de inimigos naturais envolvidos no controle natural das pragas (Rodrigues-Silva *et al.*, 2017).

A cultura do café, devido a sua natureza perene, hospeda diferentes espécies de herbívoros, no entanto, poucos são considerados pragas (Venzon, 2021). No Brasil, duas espécies são consideradas pragas chaves, o bicho-mineiro *L. coffeella* e a broca-do-café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae) (Moreno-Ramirez *et al.*, 2024; Pereira *et al.*, 2021). O manejo convencional de pragas do café no Brasil, comumente é baseado nos inseticidas químicos como estratégia de controle. No entanto, os problemas ambientais, a seleção de pragas resistentes, os efeitos na saúde humana e ameaça à biodiversidade têm levado os produtores a buscarem métodos alternativos, optando por estratégias agroecológicas adequadas, afim de promover o Controle Biológico Natural (Góngora *et al.*, 2023; Harelimana; Rukazambuga; Hance, 2022; Venzon, 2021).

2.3 *Leucoptera coffeella*

O bicho-mineiro do café, *L. coffeella* é uma praga-chave da cultura, especialmente em países neotropicais, como o Brasil (Dantas *et al.*, 2021), sendo responsável por decréscimos significativos na produção (Custódio *et al.*, 2009). No estágio larval, o bicho mineiro se alimenta do parênquima paliçádico (Motta *et al.*, 2021) e, como resultado, reduz a área fotossintética e afeta negativamente o desenvolvimento da planta (Motta *et al.*, 2021; Ramírez-

Valerio *et al.*, 2021). Além disso, pode afetar a produtividade (em 30 até 70%) e a qualidade dos grãos, o que reflete na cadeia produtiva de café (Dantas *et al.*, 2021; Scalon *et al.*, 2011).

O bicho-mineiro é um inseto holometábolo (Ramiro *et al.*, 2004), passando pelas fases de ovo, larva, pupa e adulto (Lomeli-Flores; Barrera; Bernal, 2009). As fêmeas preferem ovipositar na parte superior da folha e seus ovos possuem aspecto gelatinoso, o que dificulta sua visualização (Guerreiro Filho, 2006). A fase larval é composta por quatro instares, com diferenças morfológicas que podem ser identificadas pela largura da capsula cefálica (1º 0,14±0,03; 2º 0,25±0,04; 3º 0,32±0,03; 4º 0,42±0,03) ou pelas cerdas corporais presentes no 1º instar, as falsas pernas presentes no 3º instar, e os ganchos dispostos na linha ecdisial, sobre a sutura frontal, nas larvas de 4º instar (Motta *et al.*, 2021). Após a penetração da larva no interior da folha, ela não consegue se deslocar para outra folha durante toda a fase (Reis Jr. *et al.*, 2000). No último instar, abandonam os tuneis e entram na fase de pupa, tecendo um casulo, geralmente na parte abaxial das folhas (Guerreiro Filho, 2006). Existem relatos que indicam que o acasalamento, em condições de laboratório, é diurno, com ocorrência entre 4 e 6 horas do começo da fotofase (Michereff; Michereff Filho; Vilela, 2007).

Geralmente, a densidade populacional de *L. coffeella* é determinada por fatores abióticos, como a precipitação pluvial, a radiação solar e as lâminas de irrigação, bem como por fatores bióticos, como os inimigos naturais (Fernandes *et al.*, 2009). O fator ambiental é determinante na dinâmica populacional da praga. Nos agroecossistemas com maior índice de precipitação, com maior frequência de uso de inseticidas e naqueles mais diversificados, a população diminui, mas, quando existe aumento de temperatura e maior cobertura florestal, sua população incrementa (Santos *et al.*, 2023). A incidência de *L. coffeella* nas culturas de café pode apresentar maior agressividade nas estações secas e quentes (Giraldo-Jaramillo; Quiroga-Mosquera; Fernandes, 2024; Pereira *et al.*, 2007; Scalon *et al.*, 2011). O bicho mineiro pode apresentar cerca de 8 a 16 gerações anualmente, com variação baseada em condições térmicas e distribuição de precipitação (Giraldo-Jaramillo; Quiroga-Mosquera; Fernandes, 2024).

Além dos fatores abióticos, existe uma diversidade de inimigos naturais associados ao bicho-mineiro do café, entre eles *C. externa* (Carvalho; Carvalho; Souza, 2019)

2.4 *Chrysoperla externa*

O predador *C. externa* pode ser encontrado naturalmente em diferentes agroecossistemas (Lavagnini; Freitas; Bezerra, 2009), com ocorrência registrada em diversas culturas de importância agrícola. Somente as larvas são predadoras, podendo se alimentar de uma ampla variedade de presas (Martins Filho; Duarte; Venzon, 2023), que incluem pragas da

café (Farias *et al.*, 2023). São relatados por predação, *Planococcus citri* (Risso) (Hemiptera: Pseudococcidae), *H. hampei*, *L. coffeella*, entre outros (Barbosa *et al.*, 2008; Botti *et al.*, 2022; Dami *et al.*, 2023; Rodrigues-Silva *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2020). Recentemente, no Brasil, *C. externa* foi registrado junto ao Ministério de Agricultura e Pecuária (MAPA) para comercialização visando ao controle de *L. coffeella* (AGROFIT, 2024).

O hábito predatório das larvas de *C. externa* favorece sua liberação massal em culturas de clima tropical, reduzindo os riscos como desequilíbrio na composição e o funcionamento nos agroecossistemas (Brockerhoff; Liebhold, 2017; Ito *et al.*, 2011). Na natureza, os adultos se alimentam de pólen, néctar, honeydew (Koczor; Szentkirályi; Tóth, 2019), ou de outras substâncias açucaradas que encontram disponíveis (Resende *et al.*, 2017).

Pesquisas que buscam compreender mais profundamente as interações tritróficas, destacam a resposta atrativa dos crisopídeos a produtos químicos voláteis, visando manipular suas populações (Hesler, 2016; Koczor *et al.*, 2010). Por exemplo, alguns estudos relatam sobre a atratividade dos crisopídeos a compostos sintéticos florais, como fenilacetaldéido, ácido acético e salicilato de metila (Koczor *et al.*, 2010). Além disso, testes de eletroantogramas (EAGs) indicam que os crisopídeos preferem VOCs de milho, como 2-feniletanol, (E)- β -farneseno e isoeugenol, verificando-se maior atratividade nos machos (Hesler, 2016; Zhu *et al.*, 1999). O ácido acético, salicilato de metila e fenilacetaldéido utilizados em iscas resultaram em maior preferência para crisopídeos (Tóth *et al.*, 2009). Em bioensaios de túnel de vento, os VOCs induzidos pelos pulgões em macieiras foram mais atrativos para os crisopídeos quando combinados com ácido acético (AA) e 2-feniletanol (PET), do que quando usados separadamente. Além disso, os crisopídeos foram atraídos por nonanal, decanal, metil salicilato, geranyl acetona, acetato de (Z)-3-hexenila, butanoato de (Z)-3-hexenila, 2-metil-butanoato de (Z)-3-hexenila, β -cariofileno, β -bourboneno e benzoato de (Z)-3-hexenila (Badra *et al.*, 2021). Embora os adultos da grande maioria das espécies de crisopídeos não sejam predadores, os HIPVs atraem ambos os sexos, o que pode ser utilizado para manipular sua distribuição na área cultivada de modo a concentrar os sítios de oviposição, contribuindo, dessa forma, para o controle de pragas (Koczor *et al.*, 2010; Reddy, 2002).

As larvas de *C. externa* são predadores vorazes (Santos; Souza; Hernandez, 2024; Koczor; Szentkirályi; Tóth, 2019) e passam por três instares, cuja duração é influenciada por fatores ambientais, como a temperatura, bem como pelo tipo de alimento (Boregas; Carvalho; Souza, 2003). Durante a predação, as larvas se utilizam de suas peças bucais para injeção de fluidos digestivos e sucção de tecidos corporais dissolvidos da presa (Chapman, 2012; Haug; Braig; Haug, 2023). Nesta fase, a capacidade predatória aumenta proporcionalmente conforme

o estágio de desenvolvimento larval, enquanto a capacidade de busca pelos diferentes instares é inversamente proporcional (Maia *et al.*, 2004).

Segundo resultados de pesquisas relacionados à interação planta – inseto, os inimigos naturais têm capacidade de responderem a compostos específicos ou misturas de HIPVs (Zhou; Jander, 2022). Em relação à *C. externa*, as larvas mostraram preferência por pistas químicas específicas. Quando as plantas são induzidas à herbivoria por insetos mastigadores, os VOCs aumentam em quantidades de benzenoacetonitrila, (E)-4,8-dimetilnona-1,3,7-trieno, β -ocimeno e cariofileno, no entanto, quando induzidas por sugadores, a composição dos aldeídos alifáticos é aumentada (Valle; Mujica; Gonzalez, 2023). Quanto aos testes de resposta olfativa, as larvas dos crisopídeos, independentemente do estágio de desenvolvimento, precisam ser privadas de alimento por um determinado período de tempo (Sengonca; Kotikal; Schade, 1995).

2.5 Controle biológico

O controle biológico (CB) é um método de manejo utilizado para combater organismos prejudiciais, como insetos herbívoros, patógenos e planta não desejáveis, através do uso de inimigos naturais (Barratt *et al.*, 2018; Stenberg *et al.*, 2021), sendo cada vez mais comum como componente do Manejo Integrado de Pragas (Parra; Coelho, 2019). O controle biológico tem sido valorizado por suas potenciais inovações ecológicas na agricultura, destacando-se seus benefícios ambientais e a redução do uso de inseticidas, por meio de técnicas como a valoração contingente (Naranjo; Ellsworth; Frisvold, 2015).

Na agricultura sustentável, o controle biológico tem ganhado destaque como alternativa promissora aos pesticidas (Pappas *et al.*, 2017). No entanto, sua aplicação em áreas extensas enfrenta desafios diversos, incluindo a dispersão dos inimigos naturais para áreas vizinhas, atraso no retorno à cultura e a falta de sincronia entre a presença dos inimigos naturais e das pragas-alvo (Tooker; O’Neal; Rodriguez-Saona, 2020). A compreensão do comportamento de forrageamento dos inimigos naturais, entretanto, possibilita o desenvolvimento de técnicas viáveis, como a modificação do comportamento de dispersão e o incentivo à sua persistência na cultura (Valle; Mujica; Gonzalez, 2023).

O forrageamento dos inimigos naturais envolve a utilização de diversos estímulos, como sinais químicos, visuais, táteis e vibratórios, para detectar e capturar suas presas ou hospedeiros (Lim; Ben-Yakir, 2020). Um dos principais sinais químicos utilizados por esses insetos é a presença dos VOCs, emitidos pelas plantas como resultado de sua interação com fatores bióticos e abióticos (Rijk *et al.*, 2016; Picazo-Aragonés; Terrab; Balao, 2020). O entendimento dos HIPVs no controle biológico abre possibilidades de uso de novas estratégias para aumentar

a eficiência dos inimigos naturais no controle das pragas. O uso de HIPVs sintéticos ou a manipulação química/genética das plantas tem sido sugeridos para recrutar inimigos naturais, funcionando como agentes sinérgicos (Peñaflor; Bento, 2013).

REFERÊNCIAS

- AARTSMA, Y. *et al.* Herbivore-Induced Plant Volatiles and tritrophic interactions across spatial scales. **The New Phytologist**, v. 216, n. 4, p. 1054-1063, 2017.
- AGROFIT. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. [S. l.], 2024. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 12 abr. 2024.
- ALI, M. Y. *et al.* Tritrophic interactions among arthropod natural enemies, herbivores and plants considering volatile blends at different scale levels. **Cells**, v. 12, n. 2, p. 251, 2023.
- ALJBORY, Z.; CHEN, M.-S. Indirect plant defense against insect herbivores: a review. **Insect Science**, v. 25, n. 1, p. 2-23, 2018.
- ARIMURA, G.-I.; MATSUI, K.; TAKABAYASHI, J. Chemical and molecular ecology of herbivore-induced plant volatiles: proximate factors and their ultimate functions. **Plant & Cell Physiology**, v. 50, n. 5, p. 911-923, 2009.
- AYELO, P. M. *et al.* Exploring the kairomone-based foraging behaviour of natural enemies to enhance biological control: A Review. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 9, 2021.
- BADRA, Z. *et al.* Species-specific induction of plant volatiles by two aphid species in apple: real time measurement of plant emission and attraction of lacewings in the wind tunnel. **Journal of Chemical Ecology**, v. 47, n. 7, p. 653-663, 2021.
- BAKER, B. P.; GREEN, T. A.; LOKER, A. J. Biological control and integrated pest management in organic and conventional systems. **Biological Control**, v. 140, p. 104095, 2020.
- BARBOSA, L. R. *et al.* Eficiência de *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861)(Neuroptera: Chrysopidae) no controle de *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae) em pimentão (*Capsicum annum* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1113-1119, 2008.
- BARRATT, B. I. P. *et al.* The status of biological control and recommendations for improving uptake for the future. **BioControl**, v. 63, n. 1, p. 155-167, 2018.
- BECKER, C. *et al.* Effects of abiotic factors on HIPV-mediated interactions between plants and parasitoids. **BioMed Research International**, v. 2015, p. 342982, 2015.
- BONCAN, D. A. T. *et al.* Terpenes and terpenoids in plants: interactions with environment and insects. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 19, p. 7382, 2020.
- BOREGAS, K. G. B.; CARVALHO, C. F.; SOUZA, B. Aspectos biológicos de *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861)(Neuroptera: Chrysopidae) em casa-de-vegetação. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, p. 07-16, 2003.
- BOTTI, J. M. C. *et al.* Predation of coffee berry borer by a green lacewing. **Neotropical Entomology**, v. 51, n. 1, p. 160-163, 2022.

BROCKERHOFF, E. G.; LIEBHOLD, A. M. Ecology of forest insect invasions. **Biological Invasions**, v. 19, n. 11, p. 3141-3159, 2017.

CARVALHO, C.F.; CARVALHO, S.M.; SOUZA, B. Coffee. In: SOUZA, B.; VÁZQUEZ, L.L.; MARUCCI, R.C. (org). **Natural Enemies of Insects Pests in Neotropical Agroecosystems: Biological Control and Functional Biodiversity**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 277-291.

CASCONE, P. *et al.* Tobacco overexpressing β -ocimene induces direct and indirect responses against aphids in receiver tomato plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 173, p. 28-32, 2015.

CHAPMAN, R. F. **The Insects: structure and function**. 5. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2012. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781139035460/type/book>. Acesso em: 8 jun. 2024.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 10 dez. 2022.

CUSTÓDIO, A. A. *et al.* The-coffe-leaf-miner (*Leucoptera coffeella*) incidence in coffee culture (*Coffea arabica*) under central pivot irrigation. **Coffe Science**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 16-26, 2009.

DAMI, B. G. *et al.* Functional response of 3 green lacewing species (Neuroptera: Chrysopidae) to *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Journal of Insect Science**, v. 23, n. 3, p. 15, 2023.

DANTAS, J. *et al.* A Comprehensive review of the coffee leaf miner *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae) a major pest for the coffee crop in Brazil and others neotropical countries. **Insects**, v. 12, n. 12, p. 1130, 2021.

DENG, Y.; LU, S. Biosynthesis and regulation of phenylpropanoids in plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 36, n. 4, p. 257-290, 2017.

DICKE, M.; VAN LOON, J. J. A.; SOLER, R. Chemical complexity of volatiles from plants induced by multiple attack. **Nature Chemical Biology**, v. 5, n. 5, p. 317-324, 2009.

DIVEKAR, P. A. *et al.* Plant secondary metabolites as defense tools against herbivores for sustainable crop protection. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 5, p. 2690, 2022.

DUDAREVA, N. *et al.* Plant volatiles: Recent advances and future perspectives. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 25, n. 5, p. 417-440, 2006.

DURAN-FLORES, D.; HEIL, M. Sources of specificity in plant damaged-self recognition. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 32, p. 77-87, 2016.

ERB, M. Voláteis como indutores e supressores de defesa e imunidade vegetal - origens, especificidade, percepção e sinalização. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 44, p. 117-121, 2018.

- FARIAS, E. S. *et al.* Comparative toxicity of coffee insecticides to the green lacewing *Chrysoperla externa* in laboratory and persistence trials. **Crop Protection**, v. 172, p. 106336, 2023.
- FERNANDES, F. L. *et al.* Efeitos de variáveis ambientais, irrigação e vespas predadoras sobre *Leucoptera coffeella* (Guérin-Méneville) (Lepidoptera: Lyonetiidae) no cafeeiro. **Neotropical Entomology**, v. 38, p. 410–417, 2009.
- GATEHOUSE, J. A. Plant resistance towards insect herbivores: a dynamic interaction. **New Phytologist**, v. 156, n. 2, p. 145–169, 2002.
- GIRALDO-JARAMILLO, M.; QUIROGA-MOSQUERA, A.; FERNANDES, F. L. Thermal requirements and estimation of the number of generations of *Leucoptera coffeella* (Guérin-Méneville, 1842) (Lepidoptera: Lyonetiidae) in Minas Gerais state, Brazil. **Crop Protection**, v. 175, p. 106483, 2024.
- GOLMOHAMMADI, G. *et al.* Lethal and sublethal effects of three insecticides on first instar larvae of green lacewing, *Chrysoperla carnea*, Stephens. **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 41, n. 4, p. 2351–2359, 2021.
- GÓNGORA, C. E. *et al.* Sustainable strategies for the control of pests in coffee crops. **Agronomy**, v. 13, n. 12, p. 2940, 2023.
- GUERREIRO FILHO, O. Coffee leaf miner resistance. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, n. 1, p. 109–117, 2006.
- GUO, C. *et al.* Plant defense mechanisms against ozone stress: Insights from secondary metabolism. **Environmental and Experimental Botany**, v. 217, p. 105553, 2024.
- HARE, J. D. Ecological role of volatiles produced by plants in response to damage by herbivorous insects. **Annual Review of Entomology**, v. 56, n. Volume 56, 2011, p. 161-180, 2011.
- HARELIMANA, A.; RUKAZAMBUGA, D.; HANCE, T. Pests and diseases regulation in coffee agroecosystems by management systems and resistance in changing climate conditions: a review. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 129, n. 5, p. 1041-1052, 2022.
- HATANAKA, A. The biogenesis of green odour by green leaves. **Phytochemistry**, v. 34, n. 5, p. 1201-1218, 1993.
- HAUG, C.; BRAIG, F.; HAUG, J. T. Quantitative analysis of lacewing larvae over more than 100 million years reveals a complex pattern of loss of morphological diversity. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 6127, 2023.
- HESLER, L. S. Volatile semiochemicals increase trap catch of green lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) and flower flies (Diptera: Syrphidae) in corn and soybean plots. **Journal of Insect Science (Online)**, v. 16, n. 1, p. 77, 2016.

- HU, L. *et al.* Plant volatiles as regulators of plant defense and herbivore immunity: molecular mechanisms and unanswered questions. **Current Opinion in Insect Science**, v. 44, p. 82-88, 2021.
- HUMPHREYS, J. M.; CHAPPLE, C. Rewriting the lignin roadmap. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 5, n. 3, p. 224-229, 2002.
- ITO, K. *et al.* Analysis of genetic variation and phylogeny of the predatory bug, *Pilophorus typicus*, in Japan using mitochondrial gene sequences. **Journal of Insect Science**, v. 11, n. 1, p. 18, 2011.
- ITO, K.; SAKAI, S. Optimal defense strategy against herbivory in plants: Conditions selecting for induced defense, constitutive defense, and no-defense. **Journal of Theoretical Biology**, v. 260, n. 3, p. 453-459, 2009.
- KACHROO, A.; KACHROO, P. Fatty acid-derived signals in plant defense. **Annual Review of Phytopathology**, v. 47, p. 153-176, 2009.
- KESSLER, A. Plant defences against herbivore attack. *In*: ENCYCLOPEDIA OF LIFE SCIENCES. [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2017. p. 1-11. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470015902.a0001324.pub3>. Acesso em: 19 mar. 2024.
- KHAN, B. A. *et al.* Pesticides: impacts on agriculture productivity, environment, and management strategies. *In*: AFTAB, T. (org.). **Emerging Contaminants and Plants: Interactions, Adaptations and Remediation Technologies**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 109-134. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22269-6_5. Acesso em: 6 maio 2024.
- KOCZOR, S. *et al.* Attraction of *Chrysoperla carnea* complex and *Chrysopa spp.* lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) to aphid sex pheromone components and a synthetic blend of floral compounds in Hungary. **Pest Management Science**, v. 66, n. 12, p. 1374-1379, 2010.
- KOCZOR, S.; SZENTKIRÁLYI, F.; TÓTH, M. New perspectives for simultaneous attraction of *Chrysoperla* and *Chrysopa* lacewing species for enhanced biological control (Neuroptera: Chrysopidae). **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 10303, 2019.
- KRISHNAN, S. *et al.* Vulnerability of coffee (*Coffea spp.*) genetic resources in the United States. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 68, n. 7, p. 2691-2710, 2021.
- LAVAGNINI, T. C.; FREITAS, S. de; BEZERRA, A. L. Aspectos biológicos de *Chrysoperla* (Neuroptera, Chrysopidae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 53, p. 629-634, 2009.
- LEITE, S. A. *et al.* Area-wide survey of chlorantraniliprole resistance and control failure likelihood of the neotropical coffee leaf miner *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Journal of Economic Entomology**, v. 113, n. 3, p. 1399-1410, 2020a.
- LEITE, S. A. *et al.* Profile of coffee crops and management of the neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella*. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 8011, 2020b.

- LEITE, S. A. *et al.* Time-concentration interplay in insecticide resistance among populations of the neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella*. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 23, n. 2, p. 232-241, 2021.
- LIM, U. T.; BEN-YAKIR, D. Visual sensory systems of predatory and parasitic arthropods. **Biocontrol Science and Technology**, v. 30, n. 7, p. 728-739, 2020.
- LIU, J.; OSBOURN, A.; MA, P. MYB transcription factors as regulators of phenylpropanoid metabolism in plants. **Molecular Plant**, v. 8, n. 5, p. 689-708, 2015.
- LOMELI-FLORES, J. R.; BARRERA, J. F.; BERNAL, J. S. Impact of natural enemies on coffee leafminer *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae) population dynamics in Chiapas, Mexico. **Biological Control**, v. 51, n. 1, p. 51-60, 2009.
- MAIA, W. J. M. e S. *et al.* Capacidade predatória e aspectos biológicos de *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) alimentada com *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, p. 1259-1268, 2004.
- MANN, L. *et al.* A comparative study of plant volatiles induced by insect and gastropod herbivory. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 23698, 2021.
- MARTINS FILHO, S.; DUARTE, M. L.; VENZON, M. Survival analysis of the green lacewing, *Chrysoperla externa* (Hagen) exposed to neem-based products. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 292, 2023.
- MATIELLO, J. B. *et al.* Siriema AS1, cultivar de cafeeiro com resistência à ferrugem e ao bicho mineiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 9., 2015, Curitiba. **Anais [...]**. Brasília: Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, 2015.
- MATOS, C. S. M. *et al.* Influência das mudanças climáticas na dinâmica populacional do bicho-mineiro-do-cafeeiro *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville, 1842) (Lepidoptera: Lyonetiidae) no Sul de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 10., 2019, Vitória. **Anais [...]**. Brasília: Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, 2019.
- MATSUI, K. Green leaf volatiles: hydroperoxide lyase pathway of oxylipin metabolism. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 9, n. 3, p. 274-280, 2006.
- MATSUI, K.; ENGELBERTH, J. Green leaf volatiles-the forefront of plant responses against biotic attack. **Plant & Cell Physiology**, v. 63, n. 10, p. 1378-1390, 2022.
- MEENTS, A. K.; MITHÖFER, A. Plant-plant communication: is there a role for volatile damage-associated molecular patterns?. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020.
- MICHEREFF, M. F. F.; MICHEREFF FILHO, M.; VILELA, E. F. Comportamento de acasalamento do bicho-mineiro-do-cafeeiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville) (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Neotropical Entomology**, v. 36, p. 376-382, 2007.
- MITHÖFER, A.; MAFFEI, M. E. General mechanisms of plant defense and plant toxins. In: CARLINI, C. R.; LIGABUE-BRAUN, R.; GOPALAKRISHNAKONE, P. (org.). **Plant**

Toxins. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017. p. 3–24. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-007-6464-4_21. Acesso em: 17 mar. 2024.

MORALES, A. C.; LAVAGNINI, T. C.; FREITAS, S. Loss of genetic variability induced by agroecosystems: *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae) as a case study. **Neotropical Entomology**, v. 42, n. 1, p. 32-38, 2013.

MORENO-RAMIREZ, N. *et al.* Ecology and management of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*): the potential of biological control. **BioControl**, v. 69, p. 199-214, 2024.

MOSTAFA, S. *et al.* Plant responses to herbivory, wounding, and infection. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 13, p. 7031, 2022.

MOTTA, I. O. *et al.* The coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae): identification of the larval instars and description of male and female genitalia. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 65, n. 3, 2021.

MOURA, K. E. de *et al.* Desenvolvimento de um sistema especialista para o diagnóstico de doenças e pragas do café. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 10., 2019, Vitória. **Anais [...]**. Brasília: Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, 2019.

MUHLEMANN, J. K.; KLEMPIEN, A.; DUDAREVA, N. Floral volatiles: from biosynthesis to function. **Plant, Cell & Environment**, v. 37, n. 8, p. 1936-1949, 2014.

NARANJO, S. E.; ELLSWORTH, P. C.; FRISVOLD, G. B. Economic value of biological control in integrated pest management of managed plant systems. **Annual Review of Entomology**, v. 60, p. 621-645, 2015.

OLIVEIRA, C. M. *et al.* Crop losses and the economic impact of insect pests on Brazilian agriculture. **Crop Protection**, v. 56, p. 50-54, 2014.

PANTOJA-GOMEZ, L. M. *et al.* Common origin of Brazilian and Colombian populations of the neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Journal of Economic Entomology**, v. 112, n. 2, p. 924-931, 2019.

PAPPAS, M. L. *et al.* Biological and molecular control tools in plant defense. In: MÉRILLON, J.-M.; RAMAWAT, K. G. (org.). **Plant Defence: Biological Control**. Cham: Springer International Publishing, 2020. v. 22, p. 3-43. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51034-3_1. Acesso em: 11 mar. 2024.

PAPPAS, M. L. *et al.* Induced plant defences in biological control of arthropod pests: a double-edged sword. **Pest Management Science**, v. 73, n. 9, p. 1780-1788, 2017.

PARRA-POSTALI, J. R.; COELHO, A. Applied biological control in Brazil: from laboratory assays to field application. **Journal of Insect Science**, v. 19, n. 2, p. 5, 2019.

PEÑAFLORES, M. F. G. V.; BENTO, J. M. S. Herbivore-induced plant volatiles to enhance biological control in agriculture. **Neotropical Entomology**, v. 42, n. 4, p. 331-343, 2013.

- PEREIRA, A. E. *et al.* Emergence and infestation level of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae) on coffee berries on the plant or on the ground during the post-harvest period in Brazil. **Journal of Insect Science**, v. 21, n. 2, p. 10, 2021.
- PEREIRA, E. J. G. *et al.* Seasonal mortality factors of the coffee leafminer, *Leucoptera coffeella*. **Bulletin of Entomological Research**, v. 97, n. 4, p. 421-432, 2007.
- PERUZZOLO, M.; CRUZ, B.; RONQUI, L. Polinização e produtividade do café no Brasil. **Pubvet**, v. 14, p. 1-6, 2019.
- PETRUSSA, E. *et al.* Plant flavonoids--biosynthesis, transport and involvement in stress responses. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 7, p. 14950-14973, 2013.
- PICAZO-ARAGONÉS, J.; TERRAB, A.; BALAO, F. Plant Volatile Organic compounds evolution: Transcriptional regulation, epigenetics and polyploidy. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 23, p. 8956, 2020.
- PIETERSE, C. M. *et al.* Induced plant responses to microbes and insects. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, 2013. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2013.00475/full>. Acesso em: 13 mar. 2024.
- QUEIROZ, V. T. *et al.* Environmental risk assessment for sustainable pesticide use in coffee production. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 219, p. 18-27, 2018.
- RAMÍREZ-VALERIO, D. *et al.* Manejo del minador de la hoja (*Leucoptera coffeella*) en el cultivo de café en Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, v. 45, n. 2, p. 143-152, 2021.
- RAMIRO, D. A. *et al.* Caracterização anatômica de folhas de cafeeiros resistentes e suscetíveis ao bicho-mineiro. **Bragantia**, v. 63, p. 363-372, 2004.
- RANI, A. S.; SULAKSHANA, G. Herbivore-Induced Plant Volatiles. *In*: CHOUDHARY, D. K. *et al.* (org.). **Volatiles and Food Security: Role of Volatiles in Agro-ecosystems**. Singapore: Springer, 2017. p. 285-298.
- REDDY, G. V. P. Plant volatiles mediate orientation and plant preference by the predator *Chrysoperla carnea* Stephens (Neuroptera: Chrysopidae). **Biological Control**, v. 25, n. 1, p. 49-55, 2002.
- REIS, M. R. dos *et al.* Chapter 26 - Pesticide residues in coffee agroecosystems. *In*: PREEDY, V. R. (org.). **Coffee in Health and Disease Prevention**. San Diego: Academic Press, 2015. p. 235-244.
- REIS JR., R. *et al.* Method for maintenance of coffee leaves in vitro for mass rearing of *Leucoptera coffeella* (Guérin-Ménéville) (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 29, p. 849-854, 2000.
- RESENDE, A. L. S. *et al.* Flowers of Apiaceous species as sources of pollen for adults of *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera). **Biological Control**, v. 106, p. 40-44, 2017.

- RIJK, M. de. *et al.* Density-mediated indirect interactions alter host foraging behaviour of parasitoids without altering foraging efficiency. **Ecological Entomology**, v. 41, n. 5, p. 562-571, 2016.
- RODRIGUES-SILVA, N. *et al.* Relative importance of natural enemies and abiotic factors as sources of regulation of mealybugs (Hemiptera: Pseudococcidae) in Brazilian coffee plantations. **Annals of Applied Biology**, v. 171, n. 3, p. 303-315, 2017.
- ROSENKRANZ, M. *et al.* Volatile terpenes - mediators of plant-to-plant communication. **The Plant journal: for cell and molecular biology**, v. 108, n. 3, 2021.
- ROWEN, E.; KAPLAN, I. Eco-evolutionary factors drive induced plant volatiles: a meta-analysis. **New Phytologist**, v. 210, n. 1, p. 284-294, 2016.
- SALAMANCA, J. *et al.* Behavioral responses of adult lacewings, *Chrysoperla externa*, to a rose - aphid - coriander complex. **Biological Control**, v. 80, p. 103-112, 2015.
- SANTAMARIA, M. E. *et al.* Understanding plant defence responses against herbivore attacks: an essential first step towards the development of sustainable resistance against pests. **Transgenic Research**, v. 22, n. 4, p. 697-708, 2013.
- SANTOS, A. M. dos *et al.* Botanical aspects, caffeine content and antioxidant activity of *Coffea arabica*. **American Journal of Plant Sciences**, v. 10, n. 6, p. 1013-1021, 2019.
- SANTOS, J. R. dos.; SOUZA, B.; HERNANDEZ, M. M. P. Is *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae) capable of controlling *Selenothrips rubrocinctus* (Thysanoptera: Thripidae) in rose bushes?. **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 44, n. 2, p. 737-746, 2024.
- SANTOS, M. P. dos *et al.* Natural parasitism of the coffee leaf miner: climate factors, insecticide, and landscape affecting parasitoid diversity and their ecosystem services in coffee agroecosystems. **Bulletin of Entomological Research**, v. 113, n. 6, p. 814-828, 2023.
- SAVARY, S. *et al.* The global burden of pathogens and pests on major food crops. **Nature Ecology & Evolution**, v. 3, n. 3, p. 430-439, 2019.
- SCALA, A. *et al.* Green Leaf Volatiles: A Plant's multifunctional weapon against herbivores and pathogens. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 9, p. 17781-17811, 2013.
- SCALON, J. D. *et al.* Spatial and temporal dynamics of coffee-leaf-miner and predatory wasps in organic coffee field in formation. **Ciência Rural**, v. 41, p. 646-652, 2011.
- SENGONCA, Ç.; KOTIKAL, Y. K.; SCHADE, M. Olfactory reactions of *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant (Col., Coccinellidae) and *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neur., Chrysopidae) in relation to period of starvation. **Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz**, v. 68, n. 1, p. 9-12, 1995.
- SHARIFI, R.; LEE, S.M.; RYU, C.-M. Microbe-induced plant volatiles. **New Phytologist**, v. 220, n. 3, p. 684-691, 2018.

SILVA, B. K. R. da. *et al.* Spatial and dynamic distribution of *Chrysoperla spp.* and *Leucoptera coffeella* populations in coffee *Coffea arabica* L. **Precision Agriculture**, v. 25, n. 1, p. 327-346, 2024.

SOUZA, J. R. *et al.* Susceptibility of *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) to insecticides used in coffee crops. **Ecotoxicology**, v. 29, n. 9, p. 1306-1314, 2020.

STENBERG, J. A. *et al.* When is it biological control? A framework of definitions, mechanisms, and classifications. **Journal of Pest Science**, v. 94, n. 3, p. 665-676, 2021.

TAKABAYASHI, J. Herbivory-Induced Plant Volatiles mediate multitrophic relationships in ecosystems. **Plant and Cell Physiology**, v. 63, n. 10, p. 1344-1355, 2022.

TAKABAYASHI, J.; SHIOJIRI, K. Multifunctionality of herbivory-induced plant volatiles in chemical communication in tritrophic interactions. **Current Opinion in Insect Science**, v. 32, p. 110-117, 2019.

TOMAZELLA, V. B. *et al.* Visitation of social wasps in arabica coffee crop (*Coffea arabica* L.) intercropped with different tree species. **Sociobiology**, v. 65, n. 2, p. 299-304, 2018.

TOOKER, J. F.; O'NEAL, M. E.; RODRIGUEZ-SAONA, C. Balancing disturbance and conservation in agroecosystems to improve biological control. **Annual Review of Entomology**, v. 65, n. 1, p. 81-100, 2020.

TÓTH, M. *et al.* Optimization of a phenylacetaldehyde-based attractant for common green lacewings (*Chrysoperla carnea*). **Journal of Chemical Ecology**, v. 35, n. 4, p. 449-458, 2009.

TUDI, M. *et al.* Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 3, p. 1112, 2021.

VALLE, D.; MUJICA, V.; GONZALEZ, A. Herbivore-Dependent Induced Volatiles in pear plants cause differential attractive response by lacewing larvae. **Journal of Chemical Ecology**, v. 49, p. 262-275, 2023.

VENZON, M. Agro-ecological management of coffee pests in Brazil. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.721117>. Acesso em: 25 abr. 2024.

VILELA, E. F. *et al.* New spectral index and machine learning models for detecting coffee leaf miner infestation using sentinel-2 multispectral imagery. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 388, 2023.

WAR, A. R. *et al.* Mechanisms of plant defense against insect herbivores. **Plant Signaling & Behavior**, v. 7, n. 10, p. 1306-1320, 2012.

WU, J.; BALDWIN, I. T. New insights into plant responses to the attack from insect herbivores. **Annual Review of Genetics**, v. 44, n. 1, p. 1-24, 2010.

WYCKHUYS, K. A. G. *et al.* Current status and potential of conservation biological control for agriculture in the developing world. **Biological Control**, v. 65, n. 1, p. 152-167, 2013.

ZAGOSKINA, N. V. *et al.* Polyphenols in plants: structure, biosynthesis, abiotic stress regulation, and practical applications. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 18, p. 13874, 2023.

ZHANG, Z. *et al.* Morphological and biochemical factors associated with constitutive defense to thrips in alfalfa. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1175, 2022.

ZHOU, S.; JANDER, G. Molecular ecology of plant volatiles in interactions with insect herbivores. **Journal of Experimental Botany**, v. 73, n. 2, p. 449-462, 2022.

ZHU, J. *et al.* Olfactory reactions of the twelve-spotted lady beetle, *Coleomegilla maculata* and the green lacewing, *Chrysoperla carnea* to semiochemicals released from their prey and host plant: Electroantennogram and behavioral responses. **Journal of Chemical Ecology**, v. 25, n. 5, p. 1163-1177, 1999.

SEGUNDA PARTE

CAPITULO I

RESUMO

O controle biológico de pragas é crucial para a prática da agricultura sustentável, e sua eficiência pode ser aprimorada ao manipular o comportamento de inimigos naturais através de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), especialmente os Voláteis Induzidos por Herbivoria (HIPVs) emitidos pelas plantas. *Chrysoperla externa* tem se destacado como um agente promissor no controle de *Leucoptera coffeella* nos cafezais. No entanto, a influência dos VOCs induzidos pela herbivoria de *L. coffeella* sobre esta espécie permanece pouco compreendida. Neste estudo, examinamos a preferência de *C. externa* por plantas de café (*Coffea arabica*) infestadas por *L. coffeella*. Em ensaios de livre escolha, as larvas demonstraram clara preferência por plantas infestadas. Em contraste, as fêmeas adultas não exibiram preferência significativa para a oviposição nas plantas infestadas em relação às não infestadas, sugerindo que outros fatores sensoriais, além dos voláteis, podem influenciar essa escolha. No entanto, nos testes de olfatosmetria, tanto os adultos quanto as larvas de *C. externa* mostraram forte atração olfativa pelas plantas infestadas quando expostos a diferentes combinações de voláteis, destacando a importância dos HIPVs. Os resultados obtidos têm implicações práticas para o controle de pragas, indicando que a manipulação de HIPVs pode ser uma estratégia para atração de *C. externa* e melhorar o controle biológico em culturas de café. Sugere-se que futuras pesquisas explorem interações múltiplas de herbivoria para otimizar as práticas de controle biológico.

Palavras-chave: controle biológico; *Chrysoperla externa*; Compostos Orgânicos Voláteis; Voláteis Induzidos por Herbivoria.

1 INTRODUÇÃO

O Controle Biológico Conservativo (CBC) é uma estratégia complexa baseada em processos ecológicos e comportamentais, com potencial para gerenciar populações de pragas e contribuir para a redução do uso de pesticidas (Begg *et al.*, 2017; Wyckhuys *et al.*, 2013). Apesar do crescente uso de produtos biológicos pelos agricultores nos últimos anos (Maurya *et al.*, 2022; Parra; Coelho, 2019), a comercialização dos agentes de biocontrole para uso em sistemas agrícolas abertos muitas vezes carece de justificativa científica suficiente (Michaud, 2018). Diversos fatores, como a dispersão de inimigos naturais, atraso no retorno à cultura, falta de sincronia entre inimigos naturais e as pragas-alvo, condições ambientais desfavoráveis, ausência de presas/hospedeiros e a competição por alimento, contribuem para essa lacuna (Michaud, 2018; Tooker; O'Neal; Rodriguez-Saona, 2020). No entanto, compreender o comportamento de forrageamento dos inimigos naturais pode proporcionar o desenvolvimento de técnicas viáveis, modificando o comportamento de dispersão e incentivando sua persistência nos cultivos (Valle; Mujica; Gonzalez, 2023).

O comportamento de forrageamento, crucial para a sobrevivência e reprodução de inimigos naturais, envolve a localização, identificação e seleção da presa ou hospedeiro (Fellowes; van Alphen; Jervis, 2005; Lim; Ben-Yakir, 2020). Esses agentes de controle utilizam diversas pistas, como químicas, visuais, táteis e vibratórias, influenciando o comportamento tanto dos hospedeiros/presas quanto dos parasitoides/predadores, que as utilizam como pistas de forrageamento (Blande, 2021; Lim; Ben-Yakir, 2020; Reddy, 2012). Dentre essas pistas, as químicas desempenham funções fundamentais na dinâmica dos ecossistemas (Mbaluto *et al.*, 2020). Além disso, a resposta das plantas ao estresse, tanto biótico quanto abiótico, pode ser direta e indireta (Aljibory; Chen, 2018; Gatehouse, 2002; Mithöfer; Maffei, 2017). As respostas indiretas envolvem os metabolitos secundários, fundamentais na defesa das plantas (Anjali *et al.*, 2023). As substâncias liberadas pelas plantas, são conhecidas como Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), os quais representam um importante meio de transmissão de informações no ecossistema e autoproteção (Rijk *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2023; Picazo-Aragonés; Terrab; Balao, 2020). A composição dos VOCs varia conforme o estágio fisiológico e o estado metabólico das plantas (Liu *et al.*, 2023). Alguns herbívoros podem utilizar esses compostos como pistas de reconhecimento do hospedeiro ou nutrientes (Bennett; Wallsgrove, 1994). Além disso, as defesas químicas podem ter efeitos contrastantes (Mezzomo *et al.*, 2023). A eficiência defensiva das plantas depende do reconhecimento do inimigo natural frente aos VOCs específicos (Mezzomo *et al.*, 2023).

As plantas sintetizam e liberam substâncias conhecidas como *Herbivory Induced Plant Volatile* (HIPV) como mecanismos de defesa induzidos em resposta à herbivoria, ferimento ou infecção (Mithöfer; Maffei, 2017; Peñaflores; Bento, 2013; Qian *et al.*, 2024). As defesas são induzidas sistematicamente, tanto em partes infestadas quanto em não infestadas da planta (Wu; Baldwin, 2010). Além disso, sua composição e a quantidade dos voláteis podem variar com as espécies de herbívoros, a espécie vegetal, genótipo, os estágios de desenvolvimento e o ambiente (Arimura; Matsui; Takabayashi, 2009; Hare, 2011; Schuman; Baldwin, 2016). Alguns HIPVs apenas são produzidos em resposta ao dano, enquanto outros são produzidos em quantidades menores por plantas não infestadas (Holopainen; Blande, 2013). Esses voláteis, influenciam o comportamento dos herbívoros, inimigos naturais e outras interações na comunidade (Hu *et al.*, 2021; Peñaflores; Bento, 2013). Assim, as pistas químicas tornam-se importantes para localização dos herbívoros (Aartsma *et al.*, 2017). As versões sintéticas dos HIPVs podem ser utilizadas para monitorar populações de insetos benéficos (Rodríguez-Saona *et al.*, 2020). Além disso, as liberações de HIPVs podem ser exploradas como um recurso potencial para atrair ou reter os inimigos naturais nos agroecossistemas (James, 2003; Michaud, 2018; Salamanca *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2020).

A cultura do café tem seu desenvolvimento e produtividade dependentes de fatores abióticos e bióticos (Tomazella *et al.*, 2018). Por sua natureza perene, hospeda diversas espécies de herbívoros, no entanto, poucas considerados pragas (Góngora *et al.*, 2023). No Brasil, duas espécies são consideradas pragas-chave da cultura, o bicho-mineiro, *L. coffeella*, e a broca-do-café, *H. hampei* (Moreno-Ramirez *et al.*, 2024; Venzon, 2021). A susceptibilidade dos cultivares de café à *L. coffeella* foi responsável por torná-la uma das pragas mais significativas em todo o mundo (Matos *et al.*, 2011; Giraldo-Jaramillo; Quiroga-Mosquera; Fernandes, 2024).

O bicho-mineiro tem maior ocorrência nas regiões tropicais, especialmente no Brasil, o maior produtor mundial de café (Guerreiro Filho, 2006; Pantoja-Gomez *et al.*, 2019; Santiago-Salazar *et al.*, 2022), podendo apresentar de 8 a 16 gerações por ano (Giraldo-Jaramillo; Quiroga-Mosquera; Fernandes, 2024). Essa praga causa injúria se alimentando do parênquima paliçádico e elaborando galerias nas folhas, com a redução da área fotossintética (Motta *et al.*, 2021). As estratégias convencionais de controle, baseadas apenas em inseticidas sistêmicos, têm mostrado pouca eficácia (Leite *et al.*, 2020; Góngora *et al.*, 2023), além de causar desequilíbrio ambiental, como a redução da presença dos inimigos naturais (Rodrigues-Silva *et al.*, 2017). Porém, os produtores estão, cada vez mais, adotando estratégias agroecológicas para promover o Controle Biológico Conservativo (Góngora *et al.*, 2023; Harelimana; Rukazambuga; Hance, 2022; Venzon, 2021), utilizando os inimigos naturais locais como

alternativa viável para implementar nos programas de manejo integrado de pragas (Heimpel; Mills, 2017).

O crisopídeo *C. externa*, cujas larvas são predadoras generalistas vorazes (Martins Filho; Duarte; Venzon, 2023; Tamashiro *et al.*, 2023), possui distribuição Neotropical e pode ser encontrado naturalmente nos agroecossistemas, incluindo as lavouras de café (Lavagnini; Freitas; Bezerra, 2009). Recentemente, esse inimigo natural foi registrado junto ao Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) para controle de *L. coffeella* (AGROFIT, 2024). Sua distribuição geográfica abrangente e seu hábito predatório favorecem sua introdução em larga escala, reduzindo os riscos nos agroecossistemas (Ito *et al.*, 2011). Estudos demonstram a resposta positiva dos crisopídeos, tanto adultos quanto larvas, frente a HIPVs (Badra *et al.*, 2021; Salamanca *et al.*, 2015; Tóth *et al.*, 2009; Valle; Mujica; Gonzalez, 2023). Por meio dessa abordagem, pode-se manipular a população dos inimigos naturais alterando os locais de oviposição e incrementando o forrageamento (Hesler, 2016; Koczor *et al.*, 2010; Reddy, 2002).

A proteção eficiente das culturas agrícolas contra herbívoros representa um desafio contínuo na agricultura moderna (Pappas *et al.*, 2020). Apesar dos avanços na compreensão dos mecanismo de resposta à herbivoria, a aplicação prática desses conhecimentos como estratégias de controle ainda é limitada (Stout, 2023). Além disso, a atuação dos crisopídeos como agentes de controle biológico permanece incompreendida em muitos aspectos. Embora estudos recentes sugiram o potencial desses predadores no controle de pragas por meio de semioquímicos (Koczor; Szentkirályi; Tóth, 2019), ainda existem lacunas a serem preenchidas para o entendimento das interações nas cadeias tritróficas. Neste experimento, abordou-se a resposta preferencial de *C. externa* frente aos HIPVs produzidos por plantas de café atacadas por *L. coffeella*, uma área que carece de informações. Portanto, com base nas observações mencionadas sobre a resposta dos crisopídeos frente a alguns HIPVs, formulamos as seguintes hipóteses para este trabalho: i) Larvas de *C. externa* preferem plantas de café induzidas à herbivoria em comparação com plantas não infestadas. ii) Adultos de *C. externa* preferem ovipositar em plantas de café induzidas à herbivoria em comparação com plantas não infestadas. iii) Larvas de *C. externa* têm maior preferência por HIPVs em comparação com plantas não infestadas. iv) Adultos de *C. externa* mostram maior preferência por HIPVs em comparação com plantas não infestadas. Para responder a primeira e segunda hipóteses considerou-se apenas a preferência dos crisopídeos por plantas de café induzidas à herbivoria *vs.* plantas não infestadas. Já para investigar a terceira e quarta hipóteses, foi testada a resposta olfativa dos crisopídeos expostos a pistas químicas utilizando-se um olfatômetro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local da pesquisa

Os testes foram realizados no Departamento de Entomologia (DEN), Escola de Ciências Agrárias de Lavras (ESAL), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, MG, no Laboratório de Controle Biológico com Entomófagos (LCBE) e Laboratório de Ecologia Química e Interação Inseto-Planta (LEQIIP), sob temperatura de 25 ± 2 °C, umidade relativa do ar de $70\pm 10\%$ e fotoperíodo de 12:12.

2.2 Obtenção e cultivo de *Coffea arabica*

As plantas de *C. arabica*, cultivar "Mundo Novo", foram adquiridas na fase cotiledonar de um viveiro localizado no município de Machado, MG, Brasil. A escolha da cultivar foi baseada em sua suscetibilidade ao bicho-mineiro do cafeeiro e sua relevância na prática agrícola regional. As plantas foram cultivadas em saquinhos de polietileno perfurado preenchido com substrato composto por 1 kg de terra de barranco e esterco bovino na proporção 1:1, e receberam adubação suplementar. As plantas foram mantidas em casa de vegetação, sob condições sujeitas a oscilações naturais da temperatura e luminosidade. As mudas foram utilizadas nos experimentos ao atingirem 6 - 8 meses de idade ou apresentarem 8 - 10 pares de folhas. Durante todo o período, as mudas permaneceram isentas de tratamentos fitossanitários para evitar possível influência dos resíduos dos compostos químicos sobre a praga.

2.3 Criação de *Leucoptera coffeella*

A criação de *L. coffeella* iniciou-se com a coleta de folhas infestadas provenientes de cafezais localizados em Varginha, MG. Estas folhas foram dispostas em bandejas contendo ágar, onde os pecíolos foram inseridos de modo a manter a turgescência, permitindo a emergência dos adultos. Posteriormente foram mantidos em gaiolas de tecido *voile* (80 x 60 x 60cm) e alimentados com mel diluído em água destilada (1:1), fornecido em placas de Petri. Para a criação utilizaram-se plantas de café cv. Mundo Novo mantidas no LCBE sob condições ambientais controladas.

2.4 Criação de *Chrysoperla externa*

Os espécimes de *C. externa* foram provenientes da criação existente no LCBE. Os adultos foram alojados em gaiolas de criação confeccionadas em acrílico (50 x 25 x 25 cm),

enquanto as larvas foram mantidas em gaiolas de PVC (20 cm de altura por 20 cm de diâmetro), fechadas na parte superior e inferior com filme plástico de polietileno (PVC). As gaiolas de manutenção das larvas foram revestidas internamente com papel sulfite e, para evitar o canibalismo, tiras de papel higiênico foram adicionadas no interior, garantindo o adequado desenvolvimento nos diferentes estádios.

A alimentação dos adultos consistiu em uma mistura pastosa de levedura de cerveja e mel colocada em papel parafilm[®], enquanto um frasco contendo algodão e água destilada foi disponibilizado para garantir a hidratação. As larvas, no primeiro e segundo instares, foram alimentadas com ovos de *Ephestia kuehniella* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae) (Braghini *et al.*, 2024; Souza; Bezerra, 2019).

2.5 Indução das plantas de café à herbivoria por *Leucoptera coffeella*

A indução das mudas de café à herbivoria por *L. coffeella* começou com a introdução das plantas no interior das gaiolas de criação quando os insetos ainda estavam na fase adulta. As mudas foram mantidas nesse local por 36 horas servindo como substrato para oviposição por *L. coffeella*. Após esse período, as mudas foram retiradas e, utilizando-se um estereomicroscópio binocular, foram quantificados os ovos depositados em cada planta. Para garantir a padronização do nível de infestação entre as plantas, estabeleceu-se o intervalo de 30 ± 5 ovos por planta. As mudas infestadas foram mantidas em gaiolas de tecido similar. Para os ensaios foram utilizadas larvas no 3 - 4 instar.

2.6 Ensaio I: Escolha de *Chrysoperla externa* entre plantas infestadas e não infestadas por *Leucoptera coffeella*.

a) Experimento com larvas

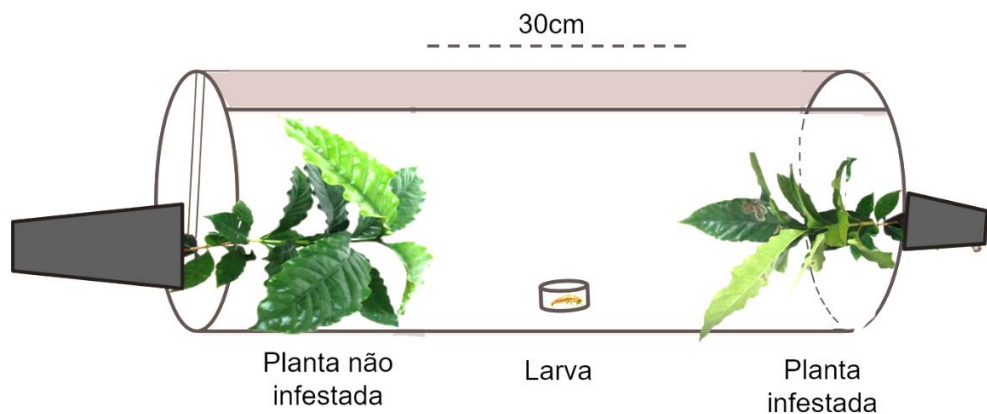
Os ensaios de preferência de escolha de larvas de *C. externa* entre plantas de café infestadas e não infestadas pelo bicho-mineiro foram conduzidos no LEQIIP. O experimento foi realizado utilizando-se um tubo de PVC (100cm de comprimento e 30 cm de diâmetro) posicionado horizontalmente e contendo uma abertura linear de 1cm de largura que se estende da borda até o centro, em ambas as extremidade do tubo de PVC. O interior do tubo foi revestido com papel Kraft branco, com gramatura de 70g e, para evitar possíveis pistas químicas deixadas pelas larvas de *C. externa*, esse papel de revestimento foi substituído a cada repetição.

Para o experimento, as plantas a serem contrastadas foram posicionadas horizontalmente e as respectivas bases introduzidas opostamente nas aberturas distais do tubo

a uma profundidade que mantivesse as folhas externamente ao tubo. A liberação das larvas ocorreu sobre uma peça cilíndrica de 2cm de diâmetro colocada no ponto médio da face interna basal do tubo. Manteve-se a distância de 30 cm entre as plantas, infestadas com larvas de 3° e 4° instares do bicho-mineiro. Liberou-se uma larva de 2° instar de *C. externa* no interior da peça cilíndrica utilizando-se um pincel de cerdas macias (Figura 1).

O experimento consistiu em 40 repetições com resposta, e tanto as plantas infestadas quanto as não infestadas foram substituídas a cada 10 repetições. As larvas utilizadas não tiveram experiência prévia com as plantas de café e foram utilizadas apenas uma vez em cada repetição, sendo liberada uma larva por repetição. Além disso, elas foram privadas do alimento 24 h antes de sua utilização nos testes. Os insetos foram considerados sem resposta quando não se movimentaram por um período máximo de 15 minutos ou quando não mostraram preferência na escolha. O experimento foi realizado entre 13h e 17 horas para manter um padrão.

Figura 1 - Escolha feita por larvas de segundo instar de *Chrysoperla externa* entre plantas de café infestadas e não infestadas por *Leucoptera coffeella*.



Fonte: Do autor (2024)

b) Experimento com fêmeas de *Chrysoperla externa* em período reprodutivo

A preferência para oviposição por fêmeas de *C. externa* foi estudada no LCBE, utilizando-se um tubo de 20 cm altura x 8 cm diâmetro, revestido internamente com papel alumínio. As aberturas das extremidades do tubo foram fechadas com filme plástico de PVC, deixando-se apenas uma abertura linear transversal e central, com cerca de 0,5 cm de comprimento, abertura suficiente para introdução de uma folha de cafeeiro. O tubo foi posicionado horizontalmente e elevado da superfície por suportes até à altura das folhas das mudas de café destinadas à avaliação.

Os tratamentos consistiram em plantas infestadas e plantas não infestadas por *L. coffeella*. Para avaliar a preferência de *C. externa* para oviposição, uma folha de cada planta, infestada e não infestada, foi introduzida pelas aberturas laterais dos tubos, como mencionado anteriormente. Individualmente, as fêmeas foram separadas dos machos com auxílio de um estereomicroscópio binocular e liberadas no interior do tubo para oviposição durante 12 horas (19 às 07h). Cada fêmea foi utilizada uma única vez e, posteriormente, descartada para evitar interferências nos resultados. Após esse período, os ovos de *C. externa* presentes em cada folha foram contabilizados. O experimento foi conduzido com 13 repetições. Os casos em que não houve preferência foram desconsiderados para análise de dados.

2.7 Ensaios II: Resposta olfativa de larvas e adultos de *Chrysoperla externa* aos voláteis de plantas induzidos pela herbivoria por *Leucoptera coffeella*.

a) Larvas

O experimento foi conduzido no LEQIIP. Para avaliar a resposta olfativa de *C. externa* em relação aos compostos voláteis das plantas induzidos por *L. coffeella*, empregou-se um sistema com olfatômetro de tubo tipo “Y”, com probabilidade de escolha de 50% para cada braço (Roberts *et al.*, 2023). O olfatômetro do tipo “Y” consistiu em um tubo de vidro transparente com diâmetro interno de 3 cm e braços com 8 cm de comprimento, formando um ângulo de 130° entre a haste e os braços. Os braços do olfatômetro foram conectados por mangueiras plásticas (80cm de comprimento e 2cm de diâmetro) às plantas, que foram inseridas em sacos plásticos esterilizados de 40 x 28 cm. Os sacos foram selados com abraçadeiras de Nylon (25x100mm) para isolar as plantas do ambiente externo. Um sistema de ar purificado foi estabelecido usando uma bomba compressora para introduzir ar ambiente filtrado por um filtro de carvão ativado e um umidificador. O ar foi conduzido através das mangueiras até uma das extremidades dos sacos com uma pressão ajustada para 2,5L/min, calibrada por meio de um fluxômetro. Além disso, para evitar qualquer influência de pistas visuais, o olfatômetro foi colocado dentro de uma caixa de papelão e posicionado verticalmente durante o experimento.

Para a avaliação da preferência olfativa, larvas de 2° instar do crisopídeo foram privadas de alimento por 24 horas antes do início do experimento e introduzidos individualmente em tubos de ensaio (10cm x 2.5cm) para evitar danos devido à agressividade e ao hábito canibal que apresentam. Para o experimento, foram necessários 4 pares de plantas (com e sem infestação por *L. coffeella*). Com o auxílio de um pincel de cerdas macias, cada larva foi introduzida individualmente no olfatômetro pela entrada da haste central e observada por até 5

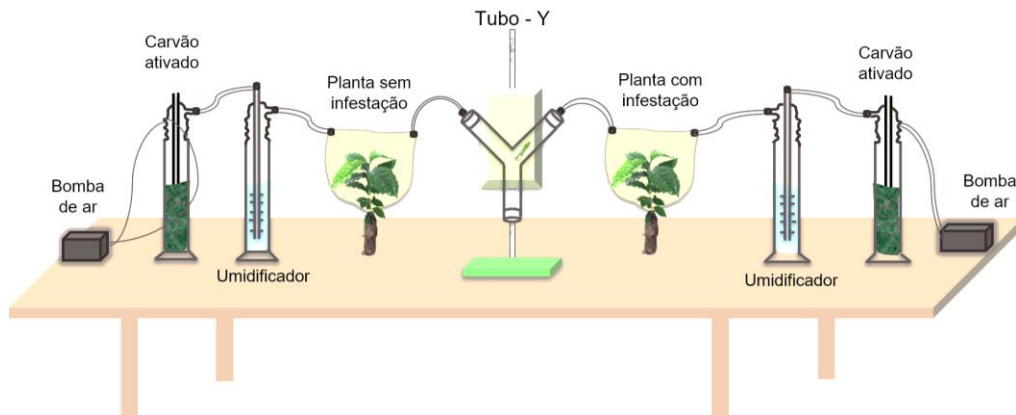
minutos (Valle; Mujica; Gonzalez, 2023). Considerou-se uma resposta quando a larva ultrapassou a linha localizada no extremo distal superior dos braços laterais do olfatômetro. Os insetos que não escolheram nenhum dos braços durante os 5 minutos foram considerados como repetições “sem resposta” e desconsideradas das análises (Strapasson *et al.*, 2014). Cada larva de *C. externa* foi utilizada apenas uma vez e descartada após o teste. As posições dos tratamentos nos braços do olfatômetro foram alternadas a cada duas repetições, e o tubo foi invertido a cada cinco repetições para excluir qualquer tendência de lado. Após dez repetições, tanto as plantas quanto o olfatômetro foram substituídos por outros. O olfatômetro usado anteriormente era lavado com detergente neutro e enxaguado com água destilada, acetato de etila e álcool de 70% e, finalmente, seco em estufa a 60°C.

b) Adultos

Para avaliar a resposta olfativa dos adultos de *C. externa*, foram utilizadas fêmeas com idade de 10 ± 2 dias após a emergência, início do período de oviposição. Cada inseto foi introduzido no braço central do olfatômetro, com um tempo de resposta máximo de 5 minutos (Figura 2). Os tubos de conexão aos braços foram alternados a cada duas repetições, e o olfatômetro foi invertido a cada cinco repetições e substituído a cada 10 repetições ou quando houve evidência de oviposição no seu interior. O procedimento da lavagem dos materiais foi o mesmo descrito para as larvas. Devido ao hábito noturno dos insetos adultos dos crisopídeos (Kral; Stelzl, 2013), os testes foram realizados no intervalo de 18 a 22 horas. Cada inseto foi utilizado uma única vez, e não houve nenhum tipo de contato prévio com as plantas de café. Foram realizadas 40 repetições para cada ensaio, e os insetos que não fizeram escolha dentro do tempo limite foram considerados como repetição “sem resposta”.

No olfatômetro, tanto as larvas quanto os adultos foram expostos aos voláteis emitidos pelas plantas. Para avaliar a preferência pelos voláteis, foram testadas as seguintes combinações: i) Planta sem infestação vs. ar limpo, ii) Planta com infestação vs. ar limpo e iii) Planta com infestação vs. planta sem infestação.

Figura 2 – Esquema do teste de escolha feita por larvas de segundo instar e adultos de *Chrysoperla externa* entre diferentes combinações de plantas de café em olfatômetro.



Fonte: Do autor (2024)

Análise estatística

A análise estatística foi realizada utilizando o software R (versão 4.3.1) (R Core Team, 2023). Os dados referentes a preferência de escolhas pelas larvas de *C. externa* do ensaio I e os dados da resposta olfativa, tanto das larvas quanto dos adultos, do ensaio II, foram analisados utilizando o Modelo Linear Generalizado (GLM) com distribuição binomial, levando-se em consideração uma probabilidade de resposta de 50% para cada tratamento. Os dados referentes à preferência para oviposição pelas fêmeas por plantas com e sem infestação foram analisados utilizando o Modelo de Regressão de Poisson. As repetições consideradas “sem resposta” foram desconsideradas das análises.

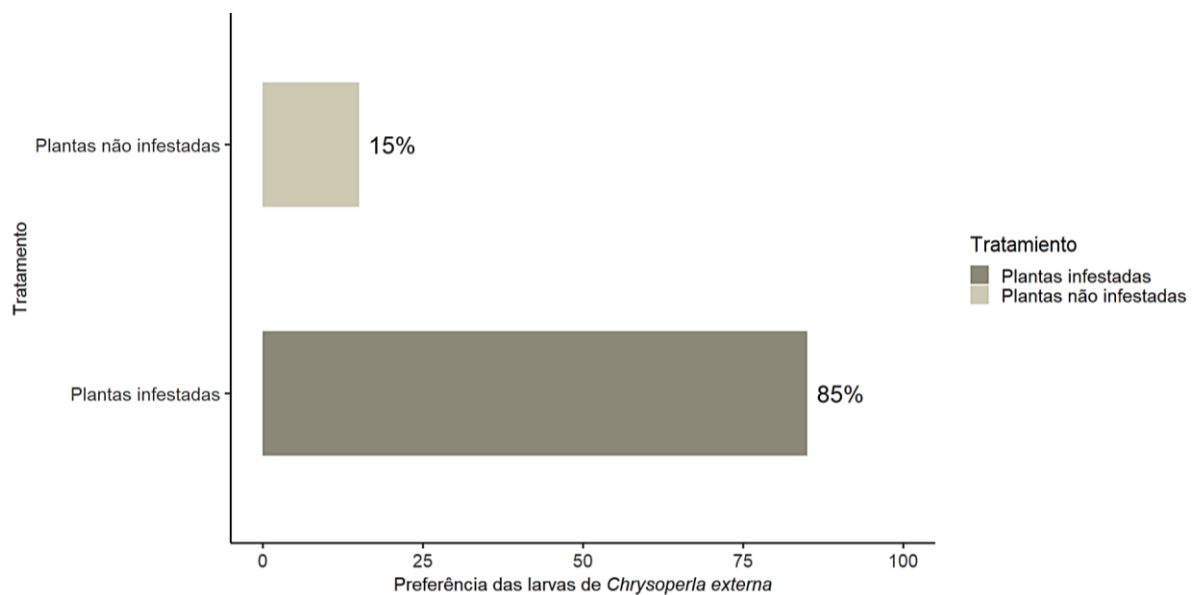
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio I: Escolha de *Chrysoperla externa* entre plantas infestadas e não infestadas por *Leucoptera coffeella*.

a) Larvas

Neste ensaio, objetivou-se avaliar a preferência na escolha de larvas de *C. externa* por plantas infestadas ou não infestadas. No teste de preferência das larvas de 2º instar de *C. externa* por plantas infestadas ou não infestadas, os resultados revelaram uma clara preferência por plantas de café induzidas pela herbivoria por *L. coffeella*, em comparação com aquelas não infestadas. Esta preferência foi significativa, com 85% das larvas optando por plantas induzidas à herbivoria (GLM; $df = 30,69$; $p < 0,001$). No entanto, em 15 repetições as larvas não demonstraram uma preferência clara dentro do tempo limite estabelecido, sendo categorizadas como “sem resposta”, o que representou 27% do total das repetições.

Figura 3 - Preferência de larvas de segundo instar de *Chrysoperla externa* por plantas de café infestadas vs. plantas não infestadas por *Leucoptera coffeella*.



Fonte: Do autor (2024)

Os resultados deste teste corroboram a primeira hipótese, uma vez que as larvas de 2º instar de *C. externa* demonstraram preferência pelas plantas de café induzidas à herbivoria por *L. coffeella*, em comparação àquelas não infestadas. Isso sugere que a infestação por *L. coffeella* desempenhou um papel fundamental nas mudanças do comportamento das larvas de *C. externa*. Este resultado é consistente com outros estudos que mostram que as larvas desse crisopídeo são

atraídas pelos voláteis induzidos pela herbivoria em diversas culturas agrícolas (Pålsson *et al.*, 2019; Valle; Mujica; Gonzalez, 2023; Zhu *et al.*, 1999).

A herbivoria usualmente ativa moléculas sinalizadoras envolvidas na transmissão de sinais induzidos em resposta à infestação das plantas (Appu *et al.*, 2021). Em nossa pesquisa, é provável que as pistas químicas tenham influenciado a resposta comportamental do crisopídeo, uma vez que eles preferiram plantas infestadas quando contrastadas com plantas não infestadas. Os voláteis induzidos pelas plantas após a herbivoria por insetos fitófagos (Valle; Mujica e Gonzalez, 2023), também explicam a preferência como resposta comportamental das larvas de 2º instar de *C. externa*.

A capacidade das larvas em geral discriminarem entre plantas infestadas e não infestadas envolve múltiplas pistas, incluindo estímulos químicos, táteis e vibratórios, o que é fundamental para a localização de habitats ou fontes de alimento (Lim; Ben-Yakir, 2020). A utilização de múltiplas pistas sensoriais aumenta a confiabilidade e o sucesso na localização das presas ou hospedeiro (Lim; Ben-Yakir, 2020; Strube-Bloss; Rössler, 2018). Embora os insetos utilizam diferentes pistas, nossos resultados evidenciam a preferência olfativa dos insetos através de pistas químicas mediadas pelas plantas infestadas e foi corroborado nos testes de olfatometria.

A metodologia empregada, com testes em condições controladas, garantiu a validade dos resultados e permitiu observar o comportamento de escolha das larvas. As estruturas de fixação das pernas dos insetos geralmente podem secretar fluidos, como hidrocarbonetos, ácidos graxos e álcoois, pelas extremidades das cerdas ou pela superfície, durante a caminhada, o que desempenha um papel de importância na adesão ao substrato, mas, contudo, isso ainda é pouco compreendido (Chapman, 2012). Neste estudo, para descartar a possibilidade de qualquer tipo de marcação e a influência nos resultados, a arena foi substituída a cada repetição.

Por outro lado, é importante considerar que a transferência de informações químicas entre as plantas pode influenciar as interações tritróficas (Salerno *et al.*, 2024). Embora os voláteis possam ser emitidos após 24 horas da infestação, genótipos específicos de plantas de soja (*Glycine max*) podem emitir quantidades significativamente diferentes de voláteis induzidos dependendo da fase de desenvolvimento (10 vezes mais na fase vegetativa) e idade das folhas (folhas jovens 2,6 vezes mais) (Rostás; Eggert, 2008). Na presente pesquisa, as plantas de cada tratamento (infestadas e não infestadas) foram mantidas isoladas até sua utilização no experimento, o que descarta a possibilidade da interação planta – planta.

b) Adultos

Os resultados do teste de preferência para oviposição apresentados pelas fêmeas de *C. externa* revelaram que não houve uma distinção significativa na escolha entre folhas de plantas infestadas e não infestadas pelo bicho-mineiro (Poisson, $df=24$; $p = 0,7774$). Portanto, as fêmeas de *C. externa* não mostraram uma preferência clara quanto à seleção de locais para oviposição quando foram disponibilizadas plantas induzidas à herbivoria pelo bicho-mineiro vs. plantas não infestadas.

A oviposição é um dos aspectos mais importantes do comportamento das fêmeas e influencia diretamente o sucesso reprodutivo (Cury; Prud'homme; Gompel, 2019). Neste teste, objetivou avaliar a preferência de oviposição por *C. externa* frente a plantas de café infestadas e não infestadas pelo bicho-mineiro. Surpreendentemente, a hipótese inicial foi rejeitada, uma vez que as fêmeas não mostraram preferência entre plantas infestadas e não infestadas. Estes resultados contrastaram com os estudos que demonstraram a atratividade e preferência de oviposição de *C. externa* por plantas infestadas. Por exemplo, em condições de casa de vegetação, Salamanca *et al.* (2015) observaram que fêmeas de *C. externa* preferiram ovipositar em roseiras infestadas por *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas) (Hemiptera: Aphididae) em relação à plantas não infestadas. Estudos com outras espécies de crisopídeos, como *Chrysoperla comanche* (Banks), *Chrysopa nigricornis* (Burmeister) e *Chrysoperla rufilabris* (Burmeister), revelaram preferência por ovipositar em plantas de noz-pecã, *Carya illinoensis*, infestadas por *Monellia caryella* (Fitch), *Melanocallis caryoefoliae* (Davis) e *Monelliopsis pecanis* Bissell (Hemiptera: Aphididae) (Kunkel; Cottrell, 2007; Petersen; Hunter, 2002). Utilizando-se iscas com compostos voláteis sintéticos em campo aberto, verificou-se a preferência para oviposição nas plantas próximas às iscas (Koczor *et al.*, 2015). Neste estudo, a ausência da preferência de oviposição nas plantas infestadas por *L. coffeella* pode ser explicada por diversos fatores. Primeiramente, as condições de laboratório podem não replicar com precisão as condições de campo devido aos insetos estarem expostos a situações de estresse, afetando suas características fisiológicas e comportamentais (Moura; Moura, 2009). Tais condições podem ter influenciado o comportamento de *C. externa*. Ademais, os resultados poderiam diferir devido a que, em condições de laboratório, pode ocorrer o canibalismo das fêmeas ao consumirem seus próprios ovos, sejam aqueles recém- ovipositados ou mesmo durante a oviposição. Em condições naturais, isso raramente ocorre, uma vez que os crisopídeos não mantêm contato com seus ovos após a oviposição (Pinto *et al.*, 2022). Além disso, a composição dos voláteis induzidos emitidos durante o dia e a noite pode ser alterada pela biossíntese ligada aos processos

foto-sintéticos (Conchou *et al.*, 2019; Rostás; Eggert, 2008; Singaas; Sharkey, 1998). O teste foi conduzido durante a noite, entre 19h e 07h, podendo ter resultado em um perfil de voláteis diferente.

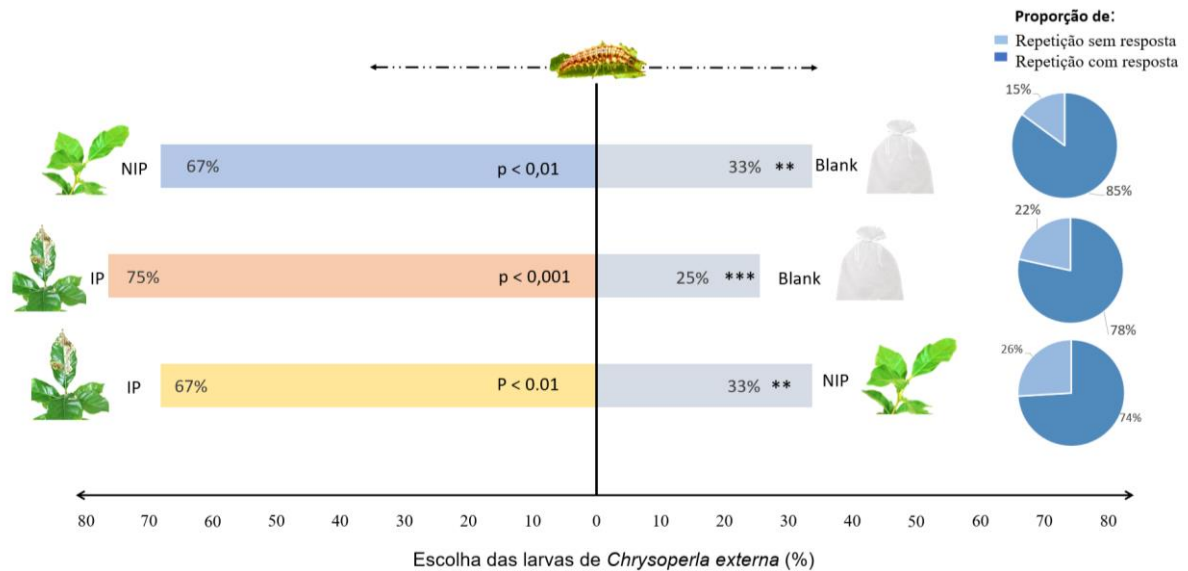
Em condições de laboratório, insetos da família Coccinellidae ovipositaram em diferentes locais dentro das gaiolas de criação devido a fatores como o geotropismo, fototropismo, higrotropismo e tigmotactismo (Seagraves, 2009). A escala espacial do experimento pode influenciar significativamente o comportamento de oviposição de insetos e deve ser considerada cuidadosamente em testes de campo, uma vez que os insetos têm liberdade de movimento, refletindo comportamentos pré e pós-pouso de maneira natural (Noriyuki, 2015). Portanto, o teste, sugere projetar experimentos em diferentes escalas espaciais para o melhor entendimento de comportamento dos crisopídeos adultos.

3.2 Ensaios II: Resposta olfativa de larvas e adultos de *Chrysoperla externa* aos voláteis de plantas induzidos por *Leucoptera coffeella*

a) Larvas

Os resultados dos ensaios de resposta olfativa pelas larvas de 2º instar de *C. externa* no teste com o olfatômetro, revelaram padrões distintos de preferência em relação aos estímulos olfativos derivados das plantas. As larvas preferiram os voláteis de plantas não infestadas em relação ao ar limpo. As diferenças entre os tratamentos foram significativas (GLM; $X^2 = 9,3752$; $df = 1$; $p < 0,01$). De modo similar, as larvas expostas aos voláteis das plantas infestadas *vs.* ar limpo mostraram preferência pelas plantas infestadas, com uma diferença altamente significativa na escolha (GLM; $X^2 = 18,104$; $df = 1$; $p < 0,001$). Além disso, ao serem expostas à escolha no olfatômetro entre plantas com infestação *vs.* plantas sem infestação, observou-se uma maior preferência pelas plantas com infestação (67%) (GLM; $X^2 = 9,3752$; $df = 1$; $p < 0,01$).

Figura 4 - Resposta olfativa de larvas de segundo instar de *Chrysoperla externa*: Plantas de café infestadas vs. plantas não infestadas por *Leucoptera coffeella*, infestadas vs. ar limpo, plantas não infestadas vs. ar limpo; e proporção de repetições “sem resposta”.



Legenda: IP = Planta infestada, NIP = Planta não infestada, Blank = Ar limpo

Fonte: Do autor (2024)

Como esperado, nos ensaios em olfatômetro, as larvas de 2º instar de *C. externa* mostraram preferência pelos odores das plantas infestadas pelo bicho-mineiro em relação às plantas não infestadas. Assim, é muito provável que a resposta preferencial das larvas seja devido aos voláteis induzidos pelas plantas de café infestadas pela praga. Esse resultado corrobora a hipótese de que os voláteis das plantas induzidos pela alimentação por *L. coffeella* são fundamentais para a localização de plantas infestadas.

Estudos prévios evidenciaram a resposta das larvas desse crisopídeo por HIPVs, como, por exemplo, larvas de 2º instar foram atraídas para plantas de pera induzidas à herbivoria por *Cacopsylla bidens* (Šulc) (Hemiptera: Psyllidae) e *Argyrotaenia sphaleropa* (Meyrick) (Lepidoptera: Tortricidae), com uma preferência maior por *C. bidens*, provavelmente devido ao aumento do cariofileno sesquiterpênico (Valle; Mujica; Gonzalez, 2023). Além disso, evidenciou-se que larvas de 3º instar de *C. externa* utilizam voláteis de plantas de caju (genótipos CCP-76 e PRO-143/73) induzidos à herbivoria por *Aleurodicus cocois* (Curtis) (Hemiptera: Aleyrodidae) para localizar sua presa (Saraiva *et al.*, 2023).

Resposta similar de preferência das larvas de *C. externa* foi registrada quando avaliada a herbivoria de *Tuta absoluta* Meyrick (Lepidoptera: Gelechiidae) em tomateiro (*Solanum lycopersicum*), induzindo ao aumento de emissão dos terpenoides (E)- β -ocimeno, isoterpinoleno e TMTT (Strapasson *et al.*, 2014). Larvas de *L. coffeella* provavelmente ativam

estratégias similares de defesa nas plantas de café devido a seu hábito alimentar semelhante ao de *T. absoluta* (Ali *et al.*, 2024). Da mesma forma, outras espécies de crisopídeos como *Chrysoperla rufilabris* (Burmeister) (Neuroptera: Chrysopidae), preferiram plantas de sorgo DKS37-07 infestadas por afídeos em relação às que não infestadas (Russavage *et al.*, 2024). Os resultados da presente pesquisa são consistentes com os de estudos anteriores que mostram a preferência atrativa de *C. externa* por plantas infestadas.

Em olfatômetro, houve uma preferência significativa das larvas pelas plantas não infestadas quando confrontadas com o ar (branco). Essa escolha pode ser decorrente da atratividade exercida pelos voláteis constitutivos das plantas de *C. arabica* cv Mundo Novo, como os terpenos ocimeno e 4,8,12 – trimetiltrideca - 1,3,7,11 - tetraeno (TMTT) (Andrade *et al.*, 2023). Assim, a resposta preferencial olfativa apresentada pelas larvas de *C. externa* pode ser devida à percepção dos VOCs constitutivos das plantas de café. Esses resultados assemelham-se àqueles em que se observou a preferência significativa de larvas de *Plutella xylostella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Plutellidae) por plantas de repolho não infestadas em relação ao ar (branco), o que foi atribuído a emissões constitutivas de terpenoides e compostos de enxofre da planta. Quando foram comparadas plantas infestadas vs. não infestadas, a preferência foi maior pelas plantas infestadas, nesse caso, não unicamente por compostos constitutivos, mas também por HIPVs, como homoterpeno (E) – 4,8-dimetil-1,3,7-nonatrieno sintetizado e pelos GLVs (Z)-3-hexenol e acetato de (Z)-3-hexenila (Li; Blande; Holopainen, 2016).

Contrariamente, um estudo mostrou que larvas de 2º instar de *C. externa* não demonstraram preferência significativa quando oferecidas plantas de pera não infestadas vs. ar (branco) (Valle; Mujica; Gonzalez, 2023). No entanto, os resultados da atratividade frente à emissão dos HIPVs podem ser influenciados pela variação genética das culturas, bem como pelo comportamento dos crisopídeos (Russavage *et al.*, 2024). Existem poucas espécies da família Chrysopidae que estão sendo estudadas com relação à ecologia química (Aldrich; Zhang, 2016). Neste teste, a combinação de plantas não infestadas vs. ar limpo não evidencia quais os voláteis da planta são responsáveis por atrair os crisopídeos, e mais trabalhos são necessários para determinar se, realmente, os compostos voláteis constitutivos causam tal comportamento. Além disso, é importante considerar que o conhecimento sobre a resposta olfativa dos insetos não é suficiente para prever seu comportamento (Conchou *et al.*, 2019).

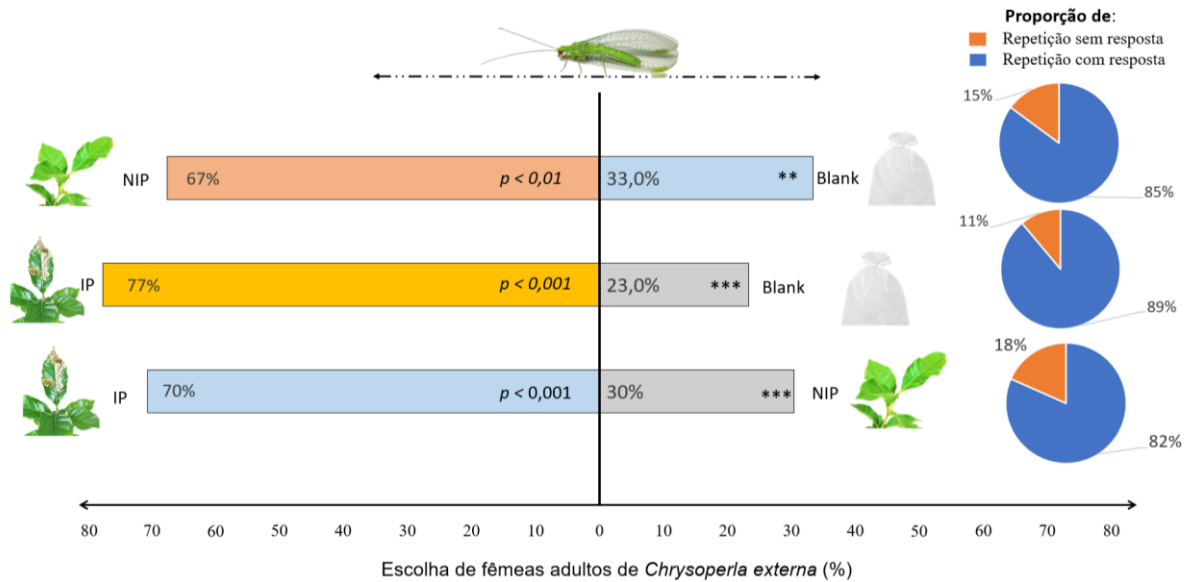
As larvas dos crisopídeos são capazes de aprender associar os voláteis ao tipo de alimento (Oliveira *et al.*, 2019). Porém, neste teste, as larvas de *C. externa* foram alimentadas com dieta artificial (Bezerra; Amaral; Souza, 2017), sem nenhum contato com voláteis vegetais,

descartando a possibilidade de aprendizado e validando os resultados obtidos. Além disso, sabe-se que os mecanismos de defesa das plantas infestadas envolvem a liberação de misturas de HIPVs atraentes aos inimigos naturais (Guo; Wang, 2019). Para a percepção da mistura de voláteis, as larvas de *C. externa* utilizam seus órgãos olfativos, como os palpos maxilares, as extensões antenais (sensilas), além de outros, para se movimentarem e aumentarem sua capacidade de localizar a presa (Binyameen *et al.*, 2021; Bruce; Pickett, 2011). Essas informações alicerçam os resultados da presente pesquisa, demonstrando que as larvas de *C. externa* são capazes de identificar os compostos voláteis induzidos pela herbivoria.

b) Adultos

Os resultados do ensaio de resposta olfativa das fêmeas de *C. externa* em período reprodutivo revelaram padrões consistentes de escolha em relação a diferentes estímulos olfativos das plantas de café. Na combinação de planta sem infestação *vs.* ar limpo, observou-se uma diferença significativa na escolha entre os tratamentos (GLM; $X^2 = 9,3752$; $df = 1$; $p < 0,01$), com preferência na escolha por plantas sem infestação (67%). De maneira semelhante, no contraste entre planta de café com infestação *vs.* ar limpo, os insetos foram atraídos pelas plantas com infestação (77%) (GLM; $X^2 = 21,338$; $df = 1$; $p < 0,001$). Na terceira combinação, quando oferecidas plantas infestadas *vs.* plantas não infestadas, a preferência olfativa das fêmeas foi direcionada para as plantas induzidas à herbivoria pelo bicho-mineiro (70%) (GLM; $X^2 = 12,061$; $df = 1$; $p < 0,001$).

Figura 5 - Resposta olfativa de fêmeas de *Chrysoperla externa*: Plantas de café infestadas vs. plantas não infestadas por *Leucoptera coffeella*, plantas não infestadas vs. ar limpo, e plantas não infestadas vs. ar limpo; e proporção de repetições “sem resposta”.



Legenda: IP = Planta infestada, NIP = Planta não infestada, Blank = Ar limpo

Fonte: Do autor (2024)

A atração de fêmeas de crisopídeos para a oviposição em cultivos agrícolas assume importância na sua liberação como agente de controle biológico (Koczor; Szentkirályi; Tóth, 2022). Os resultados da nossa pesquisa revelaram indícios importantes que ajudarão na compreensão do comportamento de forrageamento e oviposição desse crisopídeo. As fêmeas mostraram uma preferência pelos HIPVs, o que tem implicações expressivas para o controle biológico.

Esses resultados podem ser interpretados como uma adaptação evolutiva que maximiza a eficiência reprodutiva, assegurando que as larvas eclodam em um ambiente com disponibilidade de recursos (Alcalá Herrera; Campos; Ruano, 2019). Similares resultados com HIPVs foram evidenciados. Por exemplo, nos ensaios de eletroantenograma (EAG) utilizando antenas de fêmeas de *C. rufilabris* observou-se sensibilidade ao MeSA. E quando a atratividade de MeSA sintético foi testada em laboratório e em casa de vegetação, as fêmeas mostraram preferência e evidenciaram o aumento na predação e oviposição, o que não ocorreu em campo aberto, devido à complexidade do ambiente (Salamanca *et al.*, 2019). Outros estudos também se referem ao salicilato de metila como um composto de interesse na ecologia química de crisopídeos (Koczor; Szentkirályi; Tóth, 2022). Atualmente, estão sendo utilizadas iscas com compostos de fenilacetaldéido, ácido acético e salicilato de metila, na proporção 1:1:1, como atrativos para esses insetos, evidenciando a influência na preferência da escolha do local de

oviposição pelos crisopídeos (Koczor *et al.*, 2017). Tanto fêmeas quanto machos *C. carnea* também mostraram maior atratividade pelos compostos fenilacetaldéido e salicilato de metila (Koczor *et al.*, 2015; Koczor; Szentkirályi; Tóth, 2019; Tóth *et al.*, 2009), e também foram atraídos por 2-feniletanol e por salicilato de metila quando combinado com outros voláteis (Jones *et al.*, 2016). Estas informações corroboram a preferência dos crisopídeos pelos HIPVs, e provavelmente o salicilato de metila seja um dos responsáveis pela preferência da escolha pelos adultos.

Quando plantas de café cv. Mundo Novo foram expostas a diferentes tipos de herbivoria, tanto por cochonilha quanto pelo ácaro-vermelho do cafeeiro, houve aumento nos níveis de salicilato de metila em relação às plantas não infestadas (Andrade *et al.*, 2023). Nesta pesquisa, o provável aumento da emissão de salicilato de metila nas plantas induzidas à herbivoria por *L. coffeella* talvez possa explicar a atratividade das fêmeas de *C. externa* pelas pistas químicas. Contudo, deve-se ressaltar que, tanto os insetos mastigadores quanto os ácaros fitófagos são conhecidos por provocar vias defensivas específicas das plantas, que são diferentes (pelo menos em parte) daquelas eliciadas por sugadores de seiva (Cascone *et al.*, 2015). Além disso, como os crisopídeos são bastante diversos, tratar várias espécies diferentes como um todo pode levar à confusão desses fenômenos naturais em pesquisas científicas (Koczor; Szentkirályi; Tóth, 2022).

Os voláteis das plantas podem sofrer variações na composição e na quantidade segundo a reação de cada genótipo (Degen *et al.*, 2004). Nesta pesquisa, evidenciou-se a influência dos HIPVs ao contrastar plantas de café infestadas contra plantas não infestadas, embora as interações tritróficas possam ser influenciadas pela espécie do herbívoro, pelo genótipo da planta, bem como pelos estágios de desenvolvimento e pelas condições ambientais (Ali *et al.*, 2024; Meents; Mithöfer, 2020). No entanto, os resultados descartam a possibilidade dessas influências, pois foram utilizados insetos fitófagos da mesma espécie, o mesmo cultivar e as condições ambientais controladas em laboratório.

As fêmeas de *C. externa* mostraram preferência pelas plantas não infestadas em relação ao ar limpo. Resultados similares foram revelados para adultos de *Chrysoperla sinica* (Tjeder) (Neuroptera: Chrysopidae) quando oferecidos no olfatômetro voláteis das folhas de *Cnidium monnieri* vs. ar limpo, havendo preferência pelos voláteis das folhas; e quando foi comparado com os voláteis das flores, estes foram mais atrativos. A atratividade das folhas pode ser explicada pela presença de compostos como terpenos e álcoois, que atraíram tanto as fêmeas quanto os machos de *C. sinica* e, além disso, na análise eletrofisiológica da antena, compostos como D-Limoneno, linalol e nerolidol induziram respostas eletrofisiológicas mais fortes

(Huang *et al.*, 2024). Andrade *et al.* (2023) também relataram sobre a presença de compostos derivados de terpenos em plantas não infestadas de café cv. Mundo Novo. Os terpenos são compostos químicos que tem função fundamental na proteção das plantas e na ecologia (Toffolatti *et al.*, 2021), o que poderia explicar a preferência dos crisopídeos pelas plantas não infestadas.

Os resultados desta pesquisa e as evidências de estudos anteriores fazem supor que as plantas de café emitem voláteis constitutivos, como os terpenos, que podem influenciar no comportamento e na preferência de larvas e adultos de *C. externa*. Existem muitas lacunas para serem preenchidas, para melhor compreensão do comportamento dos crisopídeos nas interações tri-tróficas nos agroecossistemas.

Apesar das evidências apresentadas, estudos mais detalhados são necessários para identificar quais compostos voláteis emitidos por *C. arabica*, induzidos por *L. coffeella*, realmente contribuem para a atratividade das larvas de *C. externa*. As plantas liberam compostos voláteis em quantidade e qualidade diferentes após a infestação, e a resposta de atratividade dos crisopídeos provavelmente está relacionada a substâncias específicas. Assim, futuras pesquisas devem focar na identificação desses compostos para potencializar estratégias de controle biológico, salientando que os resultados de laboratório nem sempre são diretamente comparáveis aos de campo aberto (Laznik *et al.*, 2010; Mochizuki *et al.*, 2006).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa investigou a interação tritrófica entre planta de café, o bicho-mineiro do cafeeiro e o crisopídeo *C. externa*. Evidenciou-se que a indução à herbivoria pelo bicho-mineiro determinou o comportamento de atração, tanto pelas larvas quanto pelas fêmeas adultas de *C. externa*. No primeiro ensaio, determinou-se a preferência das larvas e dos adultos por plantas infestadas ou não infestadas. No segundo ensaio, avaliou-se unicamente a influência das pistas químicas utilizando-se HIPVs emitidos por plantas induzidas à herbivoria pelo bicho-mineiro para determinação do comportamento de escolha pelas larvas e fêmeas adultas do crisopídeo. Assim, as evidências indicam que larvas e fêmeas adultas de *C. externa* têm potencial para serem utilizadas com sucesso em programas de controle biológico em cafezais e que, ainda, seu comportamento pode ser manipulado por meio de HIPVs. Assim, os resultados sugerem analisar e identificar o composto volátil específico (ou compostos voláteis específicos) responsável pela atratividade do crisopídeos. E para os testes de preferência para oviposição, se sugere projetar experimentos em diferentes escalas espaciais de modo a melhor entender o comportamento desse crisopídeos relacionado à oviposição.

5 CONCLUSÕES

As larvas de *C. externa* mostraram preferência por plantas de café infestadas por *L. coffeella* em comparação com plantas não infestadas.

As fêmeas de *C. externa* não responderam de forma significativa aos voláteis das plantas infestadas por *L. coffeella* quanto à oviposição.

As larvas de *C. externa* confirmaram a atração olfativa mediada por VOCs constitutivos e induzidos por *L. coffeella*, quando testadas no olfatômetro e contrastadas entre plantas infestadas, não infestadas e ar limpo.

Embora as fêmeas de *C. externa* não tenham apresentado preferência por ovipositarem em plantas infestadas, no olfatômetro evidenciaram a capacidade de identificar os HIPVs e discriminar entre plantas infestadas e não infestadas.

REFERÊNCIAS

- AARTSMA, Y. *et al.* Herbivore-Induced Plant Volatiles and tritrophic interactions across spatial scales. **The New Phytologist**, v. 216, n. 4, p. 1054–1063, 2017.
- AGROFIT. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. [S. l.], 2024. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 12 abr. 2024.
- ALCALÁ HERRERA, R.; CAMPOS, M.; RUANO, F. Late summer oviposition of green lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) on olive groves and adjacent trees. **Environmental Entomology**, v. 48, n. 3, p. 506-513, 2019.
- ALDRICH, J. R.; ZHANG, Q.H. Chemical ecology of Neuroptera. **Annual Review of Entomology**, v. 61, n. 1, p. 197-218, 2016.
- ALI, J. *et al.* Defense strategies and associated phytohormonal regulation in Brassica plants in response to chewing and sap-sucking insects. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2024.
- ALJBORY, Z.; CHEN, M.S. Indirect plant defense against insect herbivores: a review. **Insect Science**, v. 25, n. 1, p. 2-23, 2018.
- ANDRADE, F. M. *et al.* Identity matters: Multiple herbivory induces less attractive or repellent coffee plant volatile emission to different natural enemies. **Journal of Chemical Ecology**, v. 49, n. 11, p. 696-709, 2023.
- ANJALI *et al.* Role of plant secondary metabolites in defence and transcriptional regulation in response to biotic stress. **Plant Stress**, v. 8, p. 100154, 2023.
- APPU, M. *et al.* An overview of plant defense-related enzymes responses to biotic stresses. **Plant Gene**, v. 27, p. 100302, 2021.
- ARIMURA, G.I.; MATSUI, K.; TAKABAYASHI, J. Chemical and molecular ecology of herbivore-induced plant volatiles: proximate factors and their ultimate functions. **Plant & Cell Physiology**, v. 50, n. 5, p. 911-923, 2009.
- BADRA, Z. *et al.* Species-specific induction of plant volatiles by two aphid species in apple: real time measurement of plant emission and attraction of lacewings in the wind tunnel. **Journal of Chemical Ecology**, v. 47, n. 7, p. 653-663, 2021.
- BEGG, G. S. *et al.* A functional overview of conservation biological control. **Crop Protection**, v. 97, p. 145-158, 2017.
- BENNETT, R. N.; WALLSGROVE, R. M. Secondary metabolites in plant defence mechanisms. **New Phytologist**, v. 127, n. 4, p. 617-633, 1994.
- BEZERRA, C. E. S.; AMARAL, B. B.; SOUZA, B. Rearing *Chrysoperla externa* larvae on artificial diets. **Neotropical Entomology**, v. 46, n. 1, p. 93-99, 2017.

BINYAMEEN, M. *et al.* Plant volatiles and their role in insect olfaction. *In*: SINGH, I. K.; SINGH, A. (org.). **Plant-Pest Interactions: From Molecular Mechanisms to Chemical Ecology: Chemical Ecology**. Singapore: Springer, 2021. p. 127–156.

BLANDE, J. D. Effects of air pollution on plant–insect interactions mediated by olfactory and visual cues. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 19, p. 100228, 2021.

BRAGHINI, A. *et al.* Testing the effects of prey type on the life history and population-level parameters of *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae). **Insects**, v. 15, n. 5, p. 330, 2024.

BRUCE, T. J. A.; PICKETT, J. A. Perception of plant volatile blends by herbivorous insects--finding the right mix. **Phytochemistry**, v. 72, n. 13, p. 1605-1611, 2011.

CASCONE, P. *et al.* Tobacco overexpressing β -ocimene induces direct and indirect responses against aphids in receiver tomato plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 173, p. 28-32, 2015.

CHAPMAN, R. F. **The Insects: structure and function**. 5. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2012. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifiier/9781139035460/type/book>. Acesso em: 8 jun. 2024.

CONCHOU, L. *et al.* Insect odorscapes: From plant volatiles to natural olfactory scenes. **Frontiers in Physiology**, v. 10, 2019.

CURY, K. M.; PRUD’HOMME, B.; GOMPEL, N. A short guide to insect oviposition: when, where and how to lay an egg. **Journal of Neurogenetics**, v. 33, n. 2, p. 75-89, 2019.

DEGEN, T. *et al.* High genetic variability of herbivore-induced volatile emission within a broad range of maize inbred lines. **Plant Physiology**, v. 135, n. 4, p. 1928-1938, 2004.

FELLOWES, M. D. E.; VAN ALPHEN, J. J. M.; JERVIS, M. A. Foraging behaviour. *In*: JERVIS, M. A. (org.). **Insects As Natural Enemies: A Practical Perspective**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005. p. 1-71. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2625-6_1. Acesso em: 29 abr. 2024.

GATEHOUSE, J. A. Plant resistance towards insect herbivores: a dynamic interaction. **New Phytologist**, v. 156, n. 2, p. 145-169, 2002.

GIRALDO-JARAMILLO, M.; QUIROGA-MOSQUERA, A.; FERNANDES, F. L. Thermal requirements and estimation of the number of generations of *Leucoptera coffeella* (Guérin-Méneville, 1842) (Lepidoptera: Lyonetiidae) in Minas Gerais state, Brazil. **Crop Protection**, v. 175, p. 106483, 2024.

GÓNGORA, C. E. *et al.* Sustainable strategies for the control of pests in coffee crops. **Agronomy**, v. 13, n. 12, p. 2940, 2023.

GUERREIRO FILHO, O. Coffee leaf miner resistance. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, n. 1, p. 109-117, 2006.

GUO, H.; WANG, C.Z. The ethological significance and olfactory detection of herbivore-induced plant volatiles in interactions of plants, herbivorous insects, and parasitoids. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 13, n. 2, p. 161-179, 2019.

HARE, J. D. Ecological role of volatiles produced by plants in response to damage by herbivorous insects. **Annual Review of Entomology**, v. 56, p. 161-180, 2011.

HARELIMANA, A.; RUKAZAMBUGA, D.; HANCE, T. Pests and diseases regulation in coffee agroecosystems by management systems and resistance in changing climate conditions: a review. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 129, n. 5, p. 1041-1052, 2022.

HEIMPEL, G. E.; MILLS, N. J. (org.). Negative consequences of biological control. *In*: **Biological Control: Ecology and Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. p. 83–113.

HESLER, L. S. Volatile semiochemicals increase trap catch of green lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) and flower flies (Diptera: Syrphidae) in corn and soybean plots. **Journal of Insect Science (Online)**, v. 16, n. 1, p. 77, 2016.

HOLOPAINEN, J. K.; BLANDE, J. D. Where do herbivore-induced plant volatiles go?. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 185, 2013.

HU, L. *et al.* Plant volatiles as regulators of plant defense and herbivore immunity: molecular mechanisms and unanswered questions. **Current Opinion in Insect Science**, v. 44, p. 82–88, 2021.

HUANG, S. *et al.* Volatile chemical cues emitted by an agricultural companion plant (*Cnidium monnieri*) attract predatory lacewings (*Chrysoperla sinica*). **Biological Control**, v. 192, p. 105516, 2024.

ITO, K. *et al.* Analysis of genetic variation and phylogeny of the predatory bug, *Pilophorus typicus*, in Japan using mitochondrial gene sequences. **Journal of Insect Science**, v. 11, n. 1, p. 18, 2011.

JAMES, D. G. Synthetic Herbivore-Induced Plant Volatiles as field attractants for beneficial insects. **Environmental Entomology**, v. 32, n. 5, p. 977-982, 2003.

JONES, V. P. *et al.* Evaluating plant volatiles for monitoring natural enemies in apple, pear and walnut orchards. **Biological Control**, v. 102, p. 53-65, 2016.

KOCZOR, S. *et al.* Attraction of *Chrysoperla carnea* complex and *Chrysopa spp.* lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) to aphid sex pheromone components and a synthetic blend of floral compounds in Hungary. **Pest Management Science**, v. 66, n. 12, p. 1374-1379, 2010.

KOCZOR, S. *et al.* Manipulation of oviposition and overwintering site choice of common green lacewings with synthetic lure (Neuroptera: Chrysopidae). **Journal of Applied Entomology**, v. 139, n. 3, p. 201-206, 2015.

- KOCZOR, S. *et al.* Smells good, feels good: oviposition of *Chrysoperla carnea*-complex lacewings can be concentrated locally in the field with a combination of appropriate olfactory and tactile stimuli. **Journal of Pest Science**, v. 90, n. 1, p. 311-317, 2017.
- KOCZOR, S.; SZENTKIRÁLYI, F.; TÓTH, M. New perspectives for simultaneous attraction of *Chrysoperla* and *Chrysopa* lacewing species for enhanced biological control (Neuroptera: Chrysopidae). **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 10303, 2019.
- KOCZOR, S.; SZENTKIRÁLYI, F.; TÓTH, M. Responses of green lacewings to semiochemicals: species- and sex-specificity (Neuroptera: Chrysopidae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 66, p. e20220069, 2022.
- KRAL, K.; STELZL, M. Daily visual sensitivity pattern in the green lacewing *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). **EJE**, v. 95, n. 3, p. 327-333, 2013.
- KUNKEL, B. A.; COTTRELL, T. E. Oviposition response of green lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) to aphids (Hemiptera: Aphididae) and potential attractants on pecan. **Environmental Entomology**, v. 36, n. 3, p. 577-583, 2007.
- LAVAGNINI, T. C.; FREITAS, S. de; BEZERRA, A. L. Aspectos biológicos de *Chrysoperla* (Neuroptera, Chrysopidae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 53, p. 629-634, 2009.
- LAZNIK, Ž. *et al.* *Oulema melanopus* (L.) (Coleoptera: Chrysomelidae) adults are susceptible to entomopathogenic nematodes (Rhabditida) attack: results from a laboratory study. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 117, n. 1, p. 30-32, 2010.
- LEITE, S. A. *et al.* Profile of coffee crops and management of the neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella*. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 8011, 2020.
- LI, T.; BLANDE, J. D.; HOLOPAINEN, J. K. Atmospheric transformation of plant volatiles disrupts host plant finding. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 33851, 2016.
- LIM, U. T.; BEN-YAKIR, D. Visual sensory systems of predatory and parasitic arthropods. **Biocontrol Science and Technology**, v. 30, n. 7, p. 728-739, 2020.
- LIU, Z. *et al.* Volatile organic compounds (VOCs) from plants: From release to detection. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 158, p. 116872, 2023.
- MARTINS FILHO, S.; DUARTE, M. L.; VENZON, M. Survival analysis of the green lacewing, *Chrysoperla externa* (Hagen) Exposed to neem-based products. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 292, 2023.
- MATOS, J. W. *et al.* Antixenosis resistance to leaf miner *Leucoptera coffeella* in *Coffea* species. **Euphytica**, v. 181, n. 2, p. 253-260, 2011.
- MAURYA, R. P. *et al.* Biological control: a global perspective. **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 42, n. 5, p. 3203-3220, 2022.

MBALUTO, C. M. *et al.* Insect chemical ecology: chemically mediated interactions and novel applications in agriculture. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 14, n. 6, p. 671-684, 2020.

MEENTS, A. K.; MITHÖFER, A. Plant–plant communication: is there a role for volatile damage-associated molecular patterns?. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020.

MEZZOMO, P. *et al.* Leaf volatile and nonvolatile metabolites show different levels of specificity in response to herbivory. **Ecology and Evolution**, v. 13, n. 5, p. e10123, 2023.

MICHAUD, J. P. Problems inherent to augmentation of natural enemies in open agriculture. **Neotropical Entomology**, v. 47, n. 2, p. 161-170, 2018.

MITHÖFER, A.; MAFFEI, M. E. General mechanisms of plant defense and plant toxins. *In*: CARLINI, C. R.; LIGABUE-BRAUN, R.; GOPALAKRISHNAKONE, P. (org.). **Plant Toxins**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017. p. 3-24.

MOCHIZUKI, A. *et al.* Larval Cannibalism and intraguild predation between the introduced green lacewing, *Chrysoperla carnea*, and the indigenous trash-carrying green lacewing (Neuroptera: Chrysopidae), as a case study of potential nontarget effect assessment. **Environmental Entomology**, v. 35, n. 5, p. 1298-1303, 2006.

MORENO-RAMIREZ, N. *et al.* Ecology and management of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*): the potential of biological control. **BioControl**, v. 69, p. 199-214, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10526-024-10253-6>. Acesso em: 25 abr. 2024.

MOTTA, I. O. *et al.* The coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae): identification of the larval instars and description of male and female genitalia. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 65, 2021.

MOURA, A. P. de; MOURA, D. C. M. de. Canibalismo de ovos por fêmeas de *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera, Chrysopidae) em criações de laboratório. **Revista Agrogeoambiental**, 2009.

NORIYUKI, S. Host selection in insects: reproductive interference shapes behavior of ovipositing females. **Population Ecology**, v. 57, n. 2, p. 293-305, 2015.

OLIVEIRA, C. M. de. *et al.* Associative learning in immature lacewings (*Ceraeochrysa cubana*). **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 167, n. 9, p. 775-783, 2019.

PÅLSSON, J. *et al.* Recruiting on the spot: A biodegradable formulation for lacewings to trigger biological control of aphids. **Insects**, v. 10, n. 1, p. 6, 2019.

PANTOJA-GOMEZ, L. M. *et al.* Common origin of Brazilian and Colombian populations of the neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Journal of Economic Entomology**, v. 112, n. 2, p. 924-931, 2019.

PAPPAS, M. L. *et al.* Biological and molecular control tools in plant defense. *In*: MÉRILLON, J.M.; RAMAWAT, K. G. (org.). **Plant Defence: Biological Control**. Cham:

Springer International Publishing, 2020. v. 23, p. 3–43. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51034-3_1. Acesso em: 11 mar. 2024.

PEÑAFLORES, M. F. G. V.; BENTO, J. M. S. Herbivore-induced plant volatiles to enhance biological control in agriculture. **Neotropical Entomology**, v. 42, n. 4, p. 331-343, 2013.

PETERSEN, M. K.; HUNTER, M. S. Ovipositional preference and larval–early adult performance of two generalist lacewing predators of aphids in pecans. **Biological Control**, v. 25, n. 2, p. 101-109, 2002.

PICAZO-ARAGONÉS, J.; TERRAB, A.; BALAO, F. Plant Volatile Organic Compounds evolution: Transcriptional regulation, epigenetics and polyploidy. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 23, p. 8956, 2020.

PINTO, M. M. D. *et al.* Oviposition behavior and biological aspects of *Ceraeochrysa cincta* (Schneider, 1851) (Neuroptera: Chrysopidae) over successive generations. **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 42, n. 5, p. 3441-3446, 2022.

PARRA POSTALI, J. R.; COELHO, A. Applied biological control in Brazil: from laboratory assays to field application. **Journal of Insect Science**, v. 19, n. 2, p. 5, 2019.

QIAN, J. *et al.* Release patterns and potential utility of herbivore-induced plant volatiles in crops: A review. **Environmental and Experimental Botany**, v. 219, p. 105659, 2024.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, University of Auckland, Nova Zelândia, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 8 jul. 2023.

REDDY, G. V. P. Plant volatiles mediate orientation and plant preference by the predator *Chrysoperla carnea* Stephens (Neuroptera: Chrysopidae). **Biological Control**, v. 25, n. 1, p. 49-55, 2002.

REDDY, G. V. P. Recent trends in the olfactory responses of insect natural enemies to plant volatiles. In: WITZANY, G.; BALUŠKA, F. (org.). **Biocommunication of Plants**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. p. 281–301. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-23524-5_15. Acesso em: 29 abr. 2024.

RIJK, M. de. *et al.* Density-mediated indirect interactions alter host foraging behaviour of parasitoids without altering foraging efficiency. **Ecological Entomology**, v. 41, n. 5, p. 562-571, 2016.

ROBERTS, J. M. *et al.* Scents and sensibility: Best practice in insect olfactometer bioassays. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 171, n. 11, p. 808-820, 2023.

RODRIGUEZ-SAONA, C. *et al.* Interactive effects of an Herbivore-Induced Plant Volatile and color on an insect community in cranberry. **Insects**, v. 11, n. 8, p. 524, 2020.

ROSTÁS, M.; EGGERT, K. Ontogenetic and spatio-temporal patterns of induced volatiles in Glycine max in the light of the optimal defence hypothesis. **Chemoecology**, v. 18, n. 1, p. 29-38, 2008.

RUSSAVAGE, E. M. *et al.* Aphid-Induced Volatiles and subsequent attraction of natural enemies varies among sorghum cultivars. **Journal of Chemical Ecology**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10886-024-01493-y>. Acesso em: 3 jun. 2024.

SALAMANCA, J. *et al.* Behavioral responses of adult lacewings, *Chrysoperla externa*, to a rose-aphid-coriander complex. **Biological Control**, v. 80, p. 103-112, 2015.

SALAMANCA, J. *et al.* Methyl Salicylate increases attraction and function of beneficial arthropods in cranberries. **Insects**, v. 10, n. 12, p. 423, 2019.

SALERNO, G. *et al.* Mechanoecology: biomechanical aspects of insect-plant interactions. **Journal of Comparative Physiology A**, v. 210, n. 2, p. 249-265, 2024.

SANTIAGO-SALAZAR, C. M. *et al.* Response of a specialist leaf miner insect to the environmental stress of its host plant. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 16, n. 3, p. 329-339, 2022.

SARAIVA, W. V. A. *et al.* *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera, Chrysopidae) is a good candidate for predation of *Aleurodicus cocois* (Curtis) (Hemiptera: Aleyrodidae) in cashew crop. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 17, n. 1, p. 99-110, 2023.

SCHUMAN, M. C.; BALDWIN, I. T. The layers of plant responses to insect herbivores. **Annual Review of Entomology**, v. 61, p. 373-394, 2016.

SEAGRAVES, M. P. Lady beetle oviposition behavior in response to the trophic environment. **Biological Control**, v. 51, n. 2, p. 313-322, 2009.

SINGSAAS, E. L.; SHARKEY, T. D. The regulation of isoprene emission responses to rapid leaf temperature fluctuations. **Plant, Cell & Environment**, v. 21, n. 11, p. 1181-1188, 1998.
STOUT, M. J. Preface: Induced resistance from theory to practice. **Journal of Chemical Ecology**, v. 49, n. 5, p. 215-216, 2023.

SOUZA, B.; BEZERRA, C.E.S. Predatory insects. *In*: SOUZA, B.; VÁZQUEZ, L.L.; MARUCCI, R.C. (org). **Natural enemies of insect pests in neotropical agroecosystems: Biological control and functional Biodiversity**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 175-187.

STRAPASSON, P. *et al.* Enhancing plant resistance at the seed stage: Low concentrations of Methyl Jasmonate reduce the performance of the leaf miner *Tuta absoluta* but do not alter the behavior of its predator *Chrysoperla externa*. **Journal of Chemical Ecology**, v. 40, n. 10, p. 1090-1098, 2014.

STRUBE-BLOSS, M. F.; RÖSSLER, W. Multimodal integration and stimulus categorization in putative mushroom body output neurons of the honeybee. **Royal Society Open Science**, v. 5, n. 2, p. 171785, 2018.

TAMASHIRO, L. A. G. *et al.* Predatory capacity and intraguild interaction between aphidophagous predators in the control of rose bush aphids. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 67, p. e20220107, 2023.

TOFFOLATTI, S. L. *et al.* 16 - Role of terpenes in plant defense to biotic stress. *In*: JOGALIAH, S. (org.). **Biocontrol Agents and Secondary Metabolites**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2021. p. 401–417. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128229194000168>. Acesso em: 9 jun. 2024.

TOMAZELLA, V. B. *et al.* Visitation of social wasps in arabica coffee crop (*Coffea Arabica* L.) intercropped with different tree species. **Sociobiology**, v. 65, n. 2, p. 299-304, 2018.

TOOKER, J. F.; O'NEAL, M. E.; RODRIGUEZ-SAONA, C. Balancing disturbance and conservation in agroecosystems to improve biological control. **Annual Review of Entomology**, v. 65, n. 1, p. 81-100, 2020.

TÓTH, M. *et al.* Optimization of a phenylacetaldehyde-based attractant for common green lacewings (*Chrysoperla carnea*). **Journal of Chemical Ecology**, v. 35, n. 4, p. 449-458, 2009.

VALLE, D.; MUJICA, V.; GONZALEZ, A. Herbivore-Dependent Induced Volatiles in pear plants cause differential attractive response by lacewing larvae. **Journal of Chemical Ecology**, v. 49, p. 262-275, 2023.

VENZON, M. Agro-ecological management of coffee pests in Brazil. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.721117>. Acesso em: 25 abr. 2024.

WU, J.; BALDWIN, I. T. New insights into plant responses to the attack from insect herbivores. **Annual Review of Genetics**, v. 44, n. 1, p. 1-24, 2010.

WYCKHUYS, K. A. G. *et al.* Current status and potential of conservation biological control for agriculture in the developing world. **Biological Control**, v. 65, n. 1, p. 152-167, 2013.

XU, S. *et al.* Allelic differences of clustered terpene synthases contribute to correlated intraspecific variation of floral and herbivory-induced volatiles in a wild tobacco. **New Phytologist**, v. 228, n. 3, p. 1083-1096, 2020.

ZHU, J. *et al.* Olfactory reactions of the twelve-spotted lady beetle, *Coleomegilla maculata* and the green lacewing, *Chrysoperla carnea* to semiochemicals released from their prey and host plant: Electroantennogram and behavioral responses. **Journal of Chemical Ecology**, v. 25, n. 5, p. 1163-1177, 1999.