

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU)
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS (ICIAG)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (POSAGRO)

CARLOS GUSTAVO DA CRUZ

Inseticidas via solo, mortalidade do bicho-mineiro-do-cafeeiro, morfofisiologia e metaboloma
de *Coffea arabica* L.

Uberlândia
2024

CARLOS GUSTAVO DA CRUZ

Inseticidas via solo, mortalidade do bicho-mineiro-do-cafeeiro, morfofisiologia e metaboloma de *Coffea arabica* L.

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Doutorado, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Dr. Flávio Lemes Fernandes

Uberlândia
2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C957
2024

Cruz, Carlos Gustavo da, 1990-
Inseticidas via solo, mortalidade do bicho-mineiro-do-
cafeeiro, morfofisiologia e metaboloma de coffea arabica
L. [recurso eletrônico] / Carlos Gustavo da Cruz. -
2024.

Orientador: Flávio Lemes Fernandes.

Coorientador: Dibio Leandro Borges.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.334>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Fernandes, Flávio Lemes, 1979-,
(Orient.). II. Borges, Dibio Leandro, 1965-, (Coorient.).
III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Agronomia. IV. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Secretaria da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppgagro.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | | | | |
|-------------------------------|--|-----------------|-------|-----------------------|-------|
| Programa de Pós-Graduação em: | Agronomia | | | | |
| Defesa de: | Tese 005/2024, PPGAGRO | | | | |
| Data: | Vinte e cinco de abril de dois mil e vinte e quatro | Hora de início: | 08:00 | Hora de encerramento: | 12:30 |
| Matrícula do Discente: | 12013AGR005 | | | | |
| Nome do Discente: | Carlos Gustavo da Cruz | | | | |
| Título do Trabalho: | Inseticidas aplicados via solo, mortalidade de <i>Leucoptera coffeella</i> (Guérin-Mèneville e Perrottet) (Lepidoptera: Lyonetiidae), a morfofisiologia e o metaboloma de <i>Coffea arabica</i> L. | | | | |
| Área de concentração: | Produção Vegetal | | | | |
| Linha de pesquisa: | Produção Vegetal em Áreas de Cerrado | | | | |

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Vanessa Andaló Mendes de Carvalho - UFU; Gleice Aparecida de Assis - UFU; Frederico Garcia Pinto - UFV; Ézio Marques da Silva - UFV; Flávio Lemes Fernandes - UFV orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Flávio Lemes Fernandes - UFU, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando ao candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gleice Aparecida de Assis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/04/2024, às 17:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa Andalo Mendes de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/04/2024, às 19:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flávio Lemes Fernandes, Usuário Externo**, em 26/04/2024, às 07:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ézio Marques da Silva, Usuário Externo**, em 26/04/2024, às 08:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Garcia Pinto, Usuário Externo**, em 30/04/2024, às 09:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5367463** e o código CRC **615756F7**.

Dedico

Aos meus pais, José Francisco da Cruz e Albertina de Fátima Muniz da Cruz, a minha avó, Jacinta Ferreira dos Santos, ao meu padrinho, Nailton Raimundo Muniz, as minhas irmãs, Mariana Muniz da Cruz e Ana Paula da Cruz. Para vocês, todo meu amor e carinho.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia por todo apoio, serei sempre grato;

À CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa;

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) *campus* Rio Paranaíba, pela recepção e por fornecer todo apoio e estrutura para realização de nossos trabalhos;

Ao meu orientador Prof. Dr. Flávio Lemes Fernandes, pela oportunidade, orientação, compreensão e por sempre atender com tanta presteza aos meus anseios. A quem admiro muito como pessoa e como profissional;

Ao Prof. Dr. Frederico Garcia Pinto, pela orientação e por conceder o espaço no Centro Integrado de Pesquisas da UFV para realização de parte do presente estudo;

Aos Professores membros da banca de defesa Prof.^a Dr.^a Vanessa Andaló Mendes de Carvalho, Prof.^a Dr.^a Gleice Aparecida de Assis, Prof. Dr. Frederico Garcia Pinto e Prof. Dr. Ézio Marques Silva pela orientação e pela solicitude em atender o nosso convite;

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Manejo Integrado de Pragas (GPMIP), em especial à Mariana, Adalberto, Samuel França, Daniel, Botrel, Monique, Babi, Pâmela, Caio, Ryan, Gerson, Samuel e ao Érick pela amizade e pela ajuda na realização dos meus experimentos;

A Brena Ikehara e Natália Reis de Almeida do Grupo de Pesquisa em Análise Metabolômica (GPAM) do *campus* Rio Paranaíba da UFV. Deixo aqui meus sinceros agradecimentos. Sempre solícitas, a ajuda de vocês concretizou a realização dos nossos trabalhos.

Aos amigos do curso Ana Flávia, João Paulo, Marcela e Tânia pela amizade e por sempre me atenderem quando mais precisei. Serei para sempre grato a vocês;

Aos amigos de república Ademir, Marco e Pedro pela excelente convivência em meus anos em Uberlândia;

Aos amigos Igão (Igor), Jesus (Wilian) e Mumuzinho (Marcelo) pelos bons momentos na República Alçapão em Rio Paranaíba;

Aos meus amigos da República o Baldinho Vitor, Murilo, Daniel, Bruna, Rafael, Jay e Natan. Obrigado pelos momentos alegres e por tornar essa etapa da minha vida inesquecível.

A todos os colaboradores da UFU e UFV, *Campus* Rio Paranaíba, deixo aqui meus agradecimentos. Muito obrigado a todos que de forma indireta ou direta me ajudaram a tornar esse sonho uma realidade.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| Resumo | 9 |
| Abstract | 11 |
| 1 Introdução Geral | 13 |
| 2 Objetivos | 17 |
| 2.1.1 Objetivos específicos | 17 |
| Referências | 18 |
| Capítulo 1 | 25 |
| Inseticidas via solo, mortalidade do bicho-mineiro-do-cafeeiro e morfofisiologia de <i>Coffea arabica</i> L. | 25 |
| Resumo | 25 |
| Abstracts | 26 |
| 1 Introdução | 27 |
| 2 Material e Métodos | 29 |
| 2.1 Condução das mudas e aplicação dos inseticidas | 29 |
| 2.1 Avaliações da fisiologia da fotossíntese das mudas | 30 |
| 2.3 Desenvolvimento da parte aérea das mudas tratadas com inseticidas sistêmicos via solo. | 30 |
| 2.4 Eficiência dos inseticidas sobre bicho-mineiro-do-cafeeiro..... | 31 |
| 2.5 Acúmulo de massa seca das mudas e desenvolvimento das raízes | 31 |
| 2.6 Análises dos dados | 32 |
| 3 Resultados | 32 |
| 3.1 Fisiologia das mudas | 32 |
| 3.2 Desenvolvimento da parte aérea das mudas | 33 |
| 3.3 Sistema radicular | 36 |
| 3.4 Infestação por bicho-mineiro..... | 39 |
| 4 Discussão | 41 |
| 5 Conclusões | 44 |
| Referências | 45 |
| Capítulo 2 | 53 |
| Inseticidas via solo utilizado no controle do Bicho-mineiro-do-cafeeiro e metaboloma de <i>Coffea arabica</i> L. | 53 |
| RESUMO | 53 |
| Abstract | 54 |
| 1 Introdução | 55 |
| 2 Material e Métodos | 57 |
| 2.1 Condução das mudas e aplicação dos inseticidas | 57 |
| 2.2 Coleta e preparo do material..... | 58 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3 Análise das amostras | 59 |
| 2.4 Processamento de dados | 59 |
| 3 Resultados | 60 |
| 3.1 Tiametoxam (Tiam. 300)/Controle..... | 60 |
| 3.2 Tiametoxam (Tiam 250)/Controle..... | 61 |
| 3.3 Imidacloprido (Imid.)/Controle | 62 |
| 3.4 Flupiradifurona (Flup.)/Controle, Dinotefuran (Dino.)/Controle e Dinotefuran + piriproxifem (Dino. + Piri.)/Controle | 65 |
| 4 Discussão | 67 |
| 5. Conclusões | 70 |
| Referências | 71 |

Resumo

CRUZ, Carlos Gustavo da. **Inseticidas via solo, mortalidade do bicho-mineiro-do-cafeeiro, morfofisiologia e metaboloma de *coffea arabica* L.** 2024. Tese (Doutorado em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

O alegado efeito bioativador dos inseticidas que são frequentemente para o controle do bicho-mineiro nos cafezais do Brasil, adiciona mais uma camada na preocupação do uso inadequado dessa tecnologia. Pensando nisso, foram conduzidos bioensaios para avaliar se os inseticidas tradicionalmente aplicados via solo proporcionam alterações na morfofisiologia, metaboloma e controle de *Leucoptera coffeella* em mudas de café arábica. Para tanto, mudas de café Catuaí Vermelho IAC 144 foram transplantadas em vasos de 3,8 L. Cada tratamento consistiu na aplicação dos inseticidas a base de tiametoxam, dinotefuram, dinotefuram + piriproxifem, imidacloprido e flupiradifurona conforme a recomendação de campo. O tratamento controle foi composto por mudas tratadas com água, o delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado com 4 repetições cada bioensaio. As mudas foram mantidas dentro de gaiolas entomológicas no interior de uma casa de vegetação. A cada 10, 20, 40, 60 e 80 dias após a aplicação dos inseticidas foram realizados um bioensaio, para isso foram sorteadas 4 mudas por tratamento em cada bioensaio, sendo cada muda uma repetição. As trocas gasosas foram analisadas aos 10, 20 e 40 dias após a aplicação dos inseticidas. Na parte aérea, foram avaliados o diâmetro do caule, altura das mudas, número de folhas, área foliar e rendimento de massa seca. No sistema radicular foram avaliados o diâmetro, número de raízes finas, área total, volume total e rendimento de massa seca das raízes. Também foi realizada avaliação da infestação do bicho-mineiro-do-cafeeiro. Para avaliação do metaboloma, 4 mudas por tratamento foram conduzidas nas mesmas condições para a avaliação da morfofisiologia. Aos 80 dias após a aplicação dos inseticidas, folhas do terceiro par foram coletadas para avaliação do metaboloma das mudas. As análises não-alvo foram conduzidas em um cromatógrafo gasoso acoplado a um espectrômetro de massas. Os resultados indicam que não houve diferenças significativas nas trocas gasosas das mudas aos 10, 20 e 40 dias após a aplicação dos inseticidas. No entanto, o inseticida neonicotinoide à base de imidacloprido resultou em redução da altura e da área foliar das mudas aos 60 e 80 dias após a aplicação, com um declínio adicional na massa seca do caule observado aos 80 dias. Não houve efeito bioativador na parte aérea das mudas com nenhum dos inseticidas testados, porém o inseticida neonicotinoide contendo tiametoxam 250 g i.a ha⁻¹ demonstrou aumento no volume e na área das raízes aos 80 dias. Os inseticidas mostraram eficácia na proteção das mudas durante todo

o período dos bioensaios, de 10 a 80 dias após a aplicação. O inseticida à base de tiametoxam 250 g i.a ha⁻¹ exerceu efeito bioativador no volume e na área das raízes das mudas de café. As aplicações dos inseticidas provocaram aumento da expressão dos açúcares livres das mudas. Os inseticidas, a base de tiametoxam 250 g i.a ha⁻¹, tiametoxam 300 g i.a ha⁻¹ e dinotefuram demonstraram via do metabolismo da galactose diferentes das mudas controle. Os inseticidas provocam efeitos sobre o metaboloma de mudas de café Catuai Vermelho IAC 144.

Palavras-chave: *Leucoptera coffeella*; controle químico; metabolômica; neonicotinoides; butenolidas; café Catuai Vermelho IAC 144.

Abstract

CRUZ, Carlos Gustavo da. **Soil insecticides, mortality of the coffee leaf miner, morphophysiology and metabolome of *Coffea arabica* L.** 2024. Thesis (PhD in Agronomy) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

The alleged bioactivating effect of insecticides that are often used to control leafminers in coffee plantations in Brazil adds another layer to the concern about the inappropriate use of this technology. With this in mind, bioassays were conducted to evaluate whether insecticides traditionally applied via soil provide changes in the morphophysiology, metabolome and control of *Leucoptera coffeella* in Arabica coffee seedlings. To this end, Catuaí Vermelho IAC 144 coffee seedlings were transplanted into 3.8 L pots. Each treatment consisted of the application of insecticides based on thiamethoxam, dinotefuram, dinotefuram + pyriproxifen, imidacloprid and flupyradifurone according to field recommendations. The control treatment consisted of seedlings treated with water, the design used was completely randomized with 4 repetitions of each bioassay. The seedlings were kept inside entomological cages inside a greenhouse. Every 10, 20, 40, 60 and 80 days after the application of insecticides, a bioassay was carried out, for which 4 seedlings were drawn per treatment in each bioassay, with each seedling being a repetition. Gas exchange was analyzed at 10, 20 and 40 days after insecticide application. In the aerial part, stem diameter, seedling height, number of leaves, leaf area and dry mass yield were evaluated. In the root system, the diameter, number of fine roots, total area, total volume and dry mass yield of the roots were evaluated. An assessment of the coffee miner infestation was also carried out. To evaluate the metabolome, 4 seedlings per treatment were grown under the same conditions for evaluating morphophysiology. At 80 days after insecticide application, leaves from the third pair were collected to evaluate the seedlings' metabolome. Non-target analyzes were conducted on a gas chromatograph coupled to a mass spectrometer. The results indicate that there were no significant differences in the gas exchange of the seedlings at 10, 20 and 40 days after the application of the insecticides. However, the imidacloprid-based neonicotinoid insecticide resulted in reduced seedling height and leaf area at 60 and 80 days after application, with a further decline in stem dry mass observed at 80 days. There was no bioactivating effect on the aerial part of the seedlings with any of the insecticides tested, however the neonicotinoid insecticide containing thiamethoxam 250 g a.i ha⁻¹ demonstrated an increase in root volume and area at 80 days. The insecticides were effective in protecting seedlings throughout the bioassay period, from 10 to 80 days after application. The insecticide based on thiamethoxam 250 g a.i ha⁻¹ exerted a

bioactivating effect on the volume and area of the roots of coffee seedlings. Applications of insecticides caused an increase in the expression of free sugars in the seedlings. The insecticides, based on thiamethoxam 250 g a.i ha⁻¹, thiamethoxam 300 g a.i ha⁻¹ and dinotefuram demonstrated different galactose metabolism pathways than control seedlings. Insecticides cause effects on the metabolome of Catuaí Vermelho IAC 144 coffee seedlings.

Keywords: *Leucoptera coffeella*; chemical control; metabolomics; neonicotinoids; butenolides; Catuaí Vermelho IAC 144.

1 Introdução Geral

O cafeeiro (*Coffea* sp.) é cultivado em diversos países, com *Coffea arabica* L. e *C. canephora* Pierre ex Froehner sendo os mais predominantes, correspondendo a aproximadamente 57% e 43% da produção total de café (Rocchetti et al., 2020). Como uma *commodity* de grande importância comercial, o café contribui significativamente para a economia de diversos países. Em algumas regiões, é reconhecido como o segundo produto natural mais valioso após o petróleo, com uma estimativa de mais de 1,6 bilhão de xícaras de café consumidas diariamente (Bae et al., 2014; Cappelletti et al., 2015; Ruta e Farcasanu, 2021). O rendimento global da indústria cafeeira é expresso economicamente em cerca de 200 bilhões de dólares anuais (Mahmud; Shellie; Keast, 2020).

O Brasil, líder mundial na produção e exportação de café, possui uma área cultivada de mais de 2,25 milhões de hectares, com produção estimada em 54,36 milhões de sacas no ano de 2023, concentrando-se principalmente nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo e Bahia (CONAB, 2024). Além de desempenhar um papel fundamental no setor primário, a produção de café também contribui significativamente para os setores industrial (por exemplo, indústrias alimentícias e farmacêuticas) e de serviços (por exemplo, o turismo) (Alcântara; Perrut, 2024; Saraiva et al., 2018).

No entanto, o cafeeiro enfrenta desafios causados por diversas espécies de artrópodes que podem limitar sua produção. Entre as principais pragas está o bicho-mineiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville e Perrottet) (Lepidoptera: Lyonetiidae) (Giraldo-Jaramillo, Quiroga-Mosquera, Fernandes, 2024). Para combater essas pragas, o controle químico com inseticidas de amplo espectro é comumente empregado nas plantações, devido à sua eficácia, baixo custo e rapidez de ação (Farias et al., 2023).

Desde o último século, os inseticidas sintéticos mantêm-se como um componente essencial no manejo de pragas, desempenhando um papel crucial na proteção das culturas contra danos causados por insetos e na promoção do crescimento constante da produção agrícola (Rezende-Teixeira et al., 2022). Recentemente, houve avanços consideráveis na produção de novos pesticidas, caracterizados por sua maior eficácia, baixos níveis de resíduos e toxicidade em vertebrados reduzida, os quais têm sido amplamente adotados na agricultura (Umetsu; Shirai, 2020). Entre esses novos compostos, os neonicotinoides têm recebido atenção significativa (Matsuda; Ihara; Sattelle, 2020). Os neonicotinoides são os inseticidas mais utilizados atualmente, com uma participação de cerca de 30% no mercado global de inseticidas (Calvo-Agudo et al., 2019; Sparks et al., 2020).

Os neonicotinoides, que incluem principalmente a clotianidina, o tiaclopride, acetamipride, o imidacloprido, o dinotefuram e o tiametoxam (Krupke et al., 2012; Addy-Orduna; Brodeur; Mateo, 2019) são sistêmicos e amplamente utilizados na agricultura. Eles atuam especificamente nos receptores nicotínicos de acetilcolina de insetos (nAChRs) (Lu et al., 2022). Essa ação os torna altamente eficazes no controle de pragas (Casida, 2018). No entanto, o uso destes inseticidas também traz consigo riscos associados ao uso inadequado, incluindo impactos negativos sobre insetos benéficos, como os inimigos naturais das pragas agrícolas (Shi et al., 2024).

A flupiradifurona, um inseticida butenolídeo, emergiu como o pioneiro de sua classe em 2012 (Nauen et al., 2015; Zhang et al., 2024). É visto por pesquisadores como uma alternativa aos neonicotinoides em caso de ocorrência de populações de bicho mineiro resistentes (Lu et al., 2024). As flupiradifuronas e neonicotinoides são neurotóxicos com alvo os nicotínicos de acetilcolina dos insetos (nAChR), mas envolvem sítios de ação distintos e diferentes relações estrutura-atividade, não provando haver resistência cruzada entre eles (Dal Bello et al., 2022; Zhang et al., 2024). As plantas são capazes de produzir diversos compostos butenolida como os karrikins que possuem propriedades semelhantes a hormônios, atuando na resistência a estresses, na regulação do crescimento e possuem efeitos sobre a germinação de sementes (Kamran, Melville, Waters, 2024; Yang; Lian; Wang, 2019).

A extensa dependência de inseticidas para manejo de pragas, naturalmente, levanta preocupações sobre a evolução da resistência aos inseticidas nas populações de insetos. Disso pode resultar eventuais falhas no controle, além de outras consequências além do nível populacional das pragas (Guedes; Walse; Throne, 2017). Anos se passam e as pragas ainda são grandes causadoras de prejuízos as culturas. Problema esse agravado pela resistência de pragas, que exigem um aumento no número de aplicações de inseticidas, comprometendo a vida útil dos mesmos, redução da lucratividade para as empresas em função da perda de eficácia, levando a sua não recomendação para controle (Aktar; Sengupta; Chowdhury, 2009; Barbosa; Smagghe; Guedes; 2015). O extenso uso e dependência de inseticidas químicos no controle do bicho-mineiro vem produzindo resultados negativos e evolução de populações resistente desta praga. Já ocorrem populações de bicho-mineiro resistentes a diversos grupos de inseticidas nos estados produtores de café no Brasil (Leite et al., 2020a; Leite et al., 2020b; Leite et al., 2021).

Usualmente, os insetos praga são o alvo dos pesticidas, no entanto, o impacto nas plantas, especialmente, dos inseticidas, muitas vezes é subestimado pelos profissionais de controle de pragas e até mesmo pelos pesquisadores. No entanto, é importante reconhecer que

os inseticidas têm o potencial de afetar significativamente as plantações (Guedes et al., 2016; Guedes; Rix; Cutler, 2022). Esses efeitos são mais pronunciados quando os inseticidas são absorvidos pela planta e translocados pelo sistema biológico vegetal. Assim como ocorre com os inseticidas sistêmicos (Bennett, 1957; Norris, 1967; Wedding, 1953). Tal como os neonicotinoides, butenolidas, entre outros inseticidas (Favrot et al., 2024). Inseticidas que são frequentemente usados no controle de bicho-mineiro (Leite et al., 2022).

A suposição comum ao uso de inseticidas é que os efeitos destes nas plantas são neutros ou não detectáveis. Geralmente, as alterações fisiológicas são desconsideradas para os inseticidas baseados na noção (discutível) de que a planta é apenas um agente passivo no processo de controle de insetos (Guedes et al., 2023). Porém, como consequência da aplicação de inseticidas, efeitos fitotóxicos podem ocorrer e até fitotônicos (Guedes et al., 2023; Kumar et al., 2021; Leite et al., 2022). Esses efeitos podem ser potencializados em inseticidas sistêmicos, pois, tais compostos mantêm uma associação mais intrínseca com as plantas e por períodos mais longos, favorecendo os efeitos fisiológicos (Guedes et al., 2023).

Desde a década de 1970, tem sido reconhecido que os inseticidas sistêmicos podem manifestar efeitos fitotônicos (bioativador) em plantas cultivadas, especialmente, os carbamatos e organofosforados (Lee, 1977; Pless, Cherry, Morgan Jr, 1971). Atualmente, com a introdução de novos inseticidas, como os neonicotinoides, e sua utilização cada vez mais generalizada, juntamente com a associação aos efeitos fitotônicos, é que a base subjacente desse fenômeno tem recebido atenção contínua (Macedo e Castro, 2011; Li et al., 2024; Qiu et al., 2024; Silva et al., 2022). Fato que pode ser preocupante sob certas óticas. No cafeeiro, a crença de que certos inseticidas podem manifestar efeito bioativador poderia incentivar o uso indevido desses compostos que já são largamente utilizados no controle de pragas como o bicho-mineiro (Leite et al., 2022). Assim, estudos nesse sentido são fundamentais, tendo em vista a importância econômica do cafeeiro para o Brasil e os relatos de populações de bicho-mineiro resistentes a inseticidas.

Ademais, a dualidade nas respostas das plantas ao serem confrontadas com xenobióticos é bastante variável, contudo, os estudos indicam que tais efeitos podem ser adversos como também benéficos (Godói et al., 2023; Leite et al., 2022; Dhungana et al., 2016; Yengkokpam; Mazumder, 2020). De fato, os inseticidas podem alterar uma ampla variedade de vias metabólicas e a expressão de vários genes em plantas, levando a alterações transcricionais (House; Swanton; Lukens, 2021; Shi et al., 2021; Wulff et al., 2019). Neste caso, uma análise do metaboloma das plantas poderia fornecer informações importantes para entender os efeitos desses compostos na sua fisiologia e biologia (Bai; Liu; Baldwin, 2024).

No cafeeiro, a análise metabolômica já vem sendo empregada (Farag et al., 2022), porém, os trabalhos envolvendo estudos com inseticidas são escassos, fato que demonstra a necessidade de mais pesquisas nessa área de conhecimento.

2 Objetivos

Avaliar o efeito de inseticidas à base de tiametoxam, dinotefuram, dinotefuram + piriproxifem, imidacloprido e flupiradifurona sobre a morfofisiologia, metaboloma e infestação por bicho-mineiro em mudas de café Catuaí Vermelho IAC 144.

2.1.1 Objetivos específicos

Avaliar o efeito de inseticidas à base de tiametoxam, dinotefuram, dinotefuram + piriproxifem, imidacloprido e flupiradifurona sobre a taxa de assimilação líquida de CO₂ (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}^1$), condutância estomática ao vapor de água (G_S) ($\text{mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^1$), taxa de transpiração (E) ($\text{m, mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^1$) e taxa de transporte de elétrons (ETR) ($\mu\text{mol (elétrons) m}^2/\text{s}^1$) de mudas de café Catuaí Vermelho IAC 144.

Avaliar o efeito de inseticidas à base de tiametoxam, dinotefuram, dinotefuram + piriproxifem, imidacloprido e flupiradifurona sobre a altura, diâmetro do caule, número de folhas, área foliar e de massa seca da parte aérea de mudas de café Catuaí Vermelho IAC 144.

Avaliar o efeito de inseticidas à base de tiametoxam, dinotefuram, dinotefuram + piriproxifem, imidacloprido e flupiradifurona sobre o diâmetro, o diâmetro ponderado, o número de raízes finas, a área, o volume e massa seca das raízes de mudas de café Catuaí Vermelho IAC 144.

Avaliar a mortalidade de lagartas de *L. coffeela* em mudas de café Catuaí Vermelho IAC 144 tratadas com inseticidas à base de tiametoxam, dinotefuram, dinotefuram + piriproxifem, imidacloprido e flupiradifurona.

Realizar análise metabolômica não-alvo (*non-target*) de folhas de mudas de café Catuaí Vermelho IAC 144 tratadas com inseticidas à base de tiametoxam, dinotefuram, dinotefuram + piriproxifem, imidacloprido e flupiradifurona.

Referências

- ADDY-ORDUNA, L. M.; BRODEUR, J. C.; MATEO, R. Oral acute toxicity of imidacloprid, thiamethoxam and clothianidin in eared doves: a contribution for the risk assessment of neonicotinoids in birds. **Science of the total environment**, v. 650, p. 1216-1223, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.112>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971833554X>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- AKTAR, W.; SENGUPTA, D.; CHOWDHURY, A. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. **Interdisciplinary toxicology**, v. 2, p. 1, 2009. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>. Disponível em: <https://sciendo.com/article/10.2478/v10102-009-0001-7>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- ALCÂNTARA, P. A. F.; PERRUT, I. M. Brazil's multiple coffee markets an ethnographic study of coffee production from family growers to coffee gourmets. **Consumption Markets & Culture**, v. 1, p. 1-13, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/10253866.2024.2332182>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10253866.2024.2332182>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- AGROFIT. **Sistema De Agrotóxicos Fitossanitários**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2024. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons Acesso em: 23, fevereiro de 2023.
- BAE, J. H.; PARK, J. H.; IM, S. S.; SONG, D. K. Coffee and health. **Integrative medicine research**, v. 3, p. 189-191, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imr.2014.08.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213422014000456>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- BAI, Y.; LIU, X.; BALDWIN, I. T. Using Synthetic Biology to Understand the Function of Plant Specialized Metabolites. **Annual Review of Plant Biology**, v. 75, p. 1-9, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-060223-013842>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-arplant-060223-013842>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- BARBOSA, W. F.; SMAGGHE, G.; GUEDES, R. N. C. Pesticides and reduced-risk insecticides, native bees and pantropical stingless bees: pitfalls and perspectives. *Pest Management Science*, v. 71, p. 1049-1053, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.4025>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ps.4025>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- BENNETT, S. H. The behaviour of systemic insecticides applied to plants. **Annual Review of Entomology**, v. 2, n. 1, p. 279-296, 1957. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.en.02.010157.001431>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.en.02.010157.001431>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- CALVO-AGUDO, M.; GONZÁLEZ-CABRERA, J.; PICÓ, Y.; CALATAYUD-VERNICH, P.; URBANEJA, A.; DICKE, M.; TENA, A. Neonicotinoids in excretion product of phloem-

feeding insects kill beneficial insects. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, p. 16817-16822, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1904298116>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1904298116>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CAPPELLETTI, S.; DARIA, P.; SANI, G.; AROMATARIO, M. Caffeine: cognitive and physical performance enhancer or psychoactive drug?. **Current neuropharmacology**, v. 13, p. 71-88. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/ben/cn/2015/00000013/00000001/art00009>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CASIDA, J. E. Neonicotinoids and other insect nicotinic receptor competitive modulators: progress and prospects. **Annual Review of Entomology**, v. 63, p. 125-144, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043042>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-ento-020117-043042>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café**. Brasília, 2024. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe> acesso: Acesso em: 25 fev. 2024.

DAL BELLO, F.; MEDANA, C.; GUARINO, B.; DIONI, A.; FABBRI, D.; CALZA, P. Investigation of sulfoxaflo, flupyradifurone and their transformation products in plant-based food matrices. **Food Control**, v. 132, p. 108537, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108537>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713521006757?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

DHUNGANA, S. K.; KIM, I. D.; KWAK, H. S.; SHIN, D. H. Unraveling the effect of structurally different classes of insecticide on germination and early plant growth of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 130, p. 39-43, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.12.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048357515300754>.

FARAG, M. A.; ZAYED, A.; SALLAM, I. E.; ABDELWARETH, A.; WESSJOHANN, L. A. Metabolomics-based approach for coffee beverage improvement in the context of processing, brewing methods, and quality attributes. **Foods**, v. 11, p. 864, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11060864>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/6/864>. Acesso em: 25 jan. 2024.

FARIAS, E. S.; FERNANDES, A. F.; ANDRADE, E. D.; PICANÇO, M.C. CARVALHO, G.A. Comparative toxicity of coffee insecticides to the green lacewing *Chrysoperla externa* in laboratory and persistence trials. **Crop Protection**, v. 172, p. 106336, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106336>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026121942300159X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

FAVROT, A.; MAUPAS, F.; ROYER, C.; RAAIJMAKERS, E.; DUFRANE, C.; WAUTERS, A.; MAKOWSKI, D. Efficacy of neonicotinoid and non-neonicotinoid treatments on virus yellows and sugar beet yields. **Crop Protection**, v. 180, p. 106658, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106658>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219424000863?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106483>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026121942300306X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

GODÓI, C. T. D.; CAMPOS, S. O.; MONTEIRO, S. H.; RONCHI, C. P.; SILVA, A. A.; GUEDES, R. N. C. Thiamethoxam in soybean seed treatment: Plant bioactivation and hormesis, besides whitefly control?. **Science of The Total Environment**, v. 857, p.159443, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159443>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722065421?via%3Dihub>.

GUEDES, R. N. C.; SMAGGHE, G.; STARK, J. D.; DESNEUX, N. Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs. **Annual review of entomology**, v. 61, p. 43-62, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010715-023646>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-ento-010715-023646>.

GUEDES, R. N. C.; WALSE, S. S.; THRONE, J. E. Sublethal exposure, insecticide resistance, and community stress. **Current opinion in insect science**, v. 21, p. 47-53, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2017.04.010>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2017.04.010>. Acesso em: 25 jan. 2024.

GUEDES, R. N. C.; RIX, R. R.; CUTLER, G. C. Pesticide-induced hormesis in arthropods: Towards biological systems. **Current Opinion in Toxicology**, v. 29, p. 43-50, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468202022000055?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

GUEDES, R. N. C.; BIONDI, A.; AGATHOKLEOUS, E.; NUNES-NESI, A. (Systemic) Insecticides in Plants: Phytotoxicity, Bioactivation, or Hormesis?. **Agriculture Communications**, v. 1, p. 100002, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrcom.2023.100002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949798123000029?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

HOUSE, M. A.; SWANTON, C. J.; LUKENS, L. N. The neonicotinoid insecticide thiamethoxam enhances expression of stress-response genes in *Zea mays* in an environmentally specific pattern. **Genome**, v. 64, p. 567-579, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1139/gen-2020-0110>. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/gen-2020-0110>. Acesso em: 25 jan. 2024.

KAMRAN, M.; MELVILLE, K. T.; WATERS, M. T. Karrikin signalling: impacts on plant development and abiotic stress tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 75, p. 1174-1186. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erad476>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jxb/article/75/4/1174/7450136>. Acesso em: 25 jan. 2024.

KRUPKE, C. H.; HUNT, G. J.; EITZER, B. D.; ANDINO, G.; GIVEN, K. Multiple routes of pesticide exposure for honey bees living near agricultural fields. **PLoS ONE**, v. 7, p. e29268, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029268>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0029268>. Acesso em: 25 jan. 2024.

KUMAR, P.; SUBY, S. B.; JASWINDER, K.; BAJYA, D. R.; SEKHAR, J. C.; LAKSHMI, S. P.; JHA, G. K. Assessment of crop loss caused by *Chilo partellus* in maize. **The Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 91, p. 218-221, 2021. DOI: <https://doi.org/10.56093/ijas.v91i2.111581>. Disponível em: <https://epubs.icar.org.in/index.php/IJAgs/article/download/111581/43754/338525>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LEE, T. T. Promotion of plant growth and inhibition of enzymic degradation of indole-3-acetic acid by metabolites of carbofuran, a carbamate insecticide. **Canadian Journal of Botany**, v. 55, p. 574-579, 1977. DOI: <https://doi.org/10.1139/b77-069>. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/b77-069>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LEITE, S. A.; DOS SANTOS, M. P.; RESENDE-SILVA, G. A.; DA COSTA, D. R.; MOREIRA, A. A.; LEMOS, O. L.; GUEDES, R.N.C.; CASTELLANI, M. A. Area-wide survey of chlorantraniliprole resistance and control failure likelihood of the Neotropical coffee leaf miner *Leucoptera coffeella*. **Journal of Economic Entomology**, v. 113, p. 1399–1410, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/toaa017>. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jee/toaa017>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LEITE, S. A.; GUEDES, R. N. C.; SANTOS, M. P. D.; COSTA, D. R. D.; MOREIRA, A. A.; MATSUMOTO, S. N.; LEMOS, O. L.; CASTELLANI, M. A. Profile of coffee crops and management of the Neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella*. **Sustainability**, v. 12, p. 8011, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12198011>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/19/8011>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LEITE, S. A.; DOS SANTOS, M. P.; DA COSTA, D. R.; MOREIRA, A. A.; GUEDES, R. N. C.; CASTELLANI, M. A. Time-concentration interplay in insecticide resistance among populations of the neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella*. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 23, p. 232–241, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/afe.12425>. Disponível em: <https://resjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/afe.12425>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LEITE, S. A.; GUEDES, R. N. C.; DA COSTA, D. R.; COLMENAREZ, Y. C.; MATSUMOTO, S. N.; DOS SANTOS, M. P.; COELHO, B. S.; MOREIRA, A.A.; CASTELLAN M. A. The effects of thiamethoxam on coffee seedling morphophysiology and Neotropical leaf miner (*Leucoptera coffeella*) infestations. **Pest Management Science**, v. 78, p. 2581-2587, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.6889>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ps.6889>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LI, L.; YIN, S.; PAN, W.; WANG, F.; FAN, J. Comprehensive metabolome and growth effects of thiamethoxam uptake and accumulation from soil on pak choi. **Food Chemistry**, v. 433, p. 137286, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137286>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814623019040?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LU, W.; LIU, Z.; FAN, X.; ZHANG, X.; QIAO, X.; HUANG, J. Nicotinic acetylcholine receptor modulator insecticides act on diverse receptor subtypes with distinct subunit compositions. **PLoS Genetics**, v. 18, p. e1009920, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1009920>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosgenetics/article?id=10.1371/journal.pgen.1009920>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MACEDO, W. R.; E CASTRO, P. R. D. C. Thiamethoxam: Molecule moderator of growth, metabolism and production of spring wheat. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 100, p. 299-304, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2011.05.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048357511000939?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MAHMUD, M. M. C., SHELLIE, R. A., KEAST, R. Unravelling The Relationship Between Aroma Compounds And Consumer Acceptance: Coffee as an example. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, p. 2380-2420, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12595>. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12595>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MATSUDA, K.; IHARA, M.; SATTELLE, D. B. Neonicotinoid insecticides: molecular targets, resistance, and toxicity. **Annual review of pharmacology and toxicology**. v. 60, p. 241-255, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-010818-021747>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-pharmtox-010818-021747>. Acesso em: 25 jan. 2024.

NAUEN, R.; JESCHKE, P.; VELTEN, R.; BECK, M. E.; EBBINGHAUS-KINTSCHER, U.; THIELERT, W.; WÖLFEL, K.; HAAS, M.; KUNZ, KLAUS.; RAUPACH, G. Flupyradifurone: a brief profile of a new butenolide insecticide. **Pest management science**, v. 71, p. 850-862, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.3932>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ps.3932>. Acesso em: 25 jan. 2024.

NORRIS, D. M. Systemic insecticides in trees. **Annual Review of Entomology**, v. 12, p. 127-148, 1967. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.en.12.010167.001015>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.en.12.010167.001015>. Acesso em: 25 jan. 2024.

PLESS, C. D.; CHERRY, E. T.; MORGAN JR, H. Growth and yield of burley tobacco as affected by two systemic insecticides. **Journal of economic entomology**, v. 64, p. 172-175, 1971. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/64.1.172>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jee/article-abstract/64/1/172/2210266?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 25 jan. 2024.

QIU, H.; SUN, C.; DORMATEY, R.; BAI, J.; BI, Z.; LIU, Y.; LIU Z.; WEI, J.; MAO, S.; YAO, P. Thiamethoxam Application Improves Yield and Drought Resistance of Potatoes (*Solanum tuberosum* L.). **Plants**, v. 13, p. 477, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13040477>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/4/477>. Acesso em: 25 jan. 2024.

REZENDE-TEIXEIRA, P.; DUSI, R.G.; JIMENEZ, P.C.; ESPINDOLA, L.S.; COSTA-LOTUFO, L.V. What can we learn from commercial insecticides? Efficacy, toxicity, environmental impacts, and future developments. **Environmental Pollution**, v. 300, p. 118983, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118983>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974912200197X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

ROCCHETTI, G.; BRACESCHI, G. P.; ODELLO, L.; BERTUZZI, T.; TREVISAN, M.; LUCINI, L. Identification of markers of sensory quality in ground coffee: An untargeted metabolomics approach. **Metabolomics**, v. 16, p. 1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11306-020-01751-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11306-020-01751-6>. Acesso em: 25 jan. 2024.

RUTA, L. L.; FARCASANU, I. C. Coffee and yeasts: From flavor to biotechnology. **Fermentation**, v. 7, p. 9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation7010009>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-5637/7/1/9>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SARAIVA, C. E. D. A. B.; FERNANDES, A. M.; LIMA, A. P. A.; COSTA, L. T. D.; CUNHA, C.N. Competitividade da cafeicultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 27, p. 9–16, 2018. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/13638>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SHI, F.; LU, Y.; SUN, D.; AN, Y. Imidacloprid triggers transcriptomic changes in sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Tropical Plant Biology**, v. 14, p. 203-212, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12042-021-09284-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12042-021-09284-5>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SHI, W.; ZHANG, Q.; SHENG, Y.; DONG, Z.; FENG, T.; ZHANG, J.; YU, L.; XU, Z.; PANG L.; CHEN, J.; CHEN, X.; HUANG, J. Neonicotinoid insecticide imidacloprid induces chemosensory deficits in a nontarget parasitoid wasp. **Science of The Total Environment**, v. 907, p. 168089, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168089>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723067165?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SILVA, D. P.; OLIVEIRA, M. P.; OLIVEIRA, J. A. V.; JACOMASSI, L. M.; MOMESSO, L.; GARCIA, A.; SIQUEIRA, G. F.; FOLTRAN, R.; SORATTO, R. P.; DINARDO-MIRANDA, L. L.; CRUSCIOL, C. A. C. Phytotonic effects of thiamethoxam on sugarcane managed with glyphosate as a ripener. **Pest Management Science**, v. 78, p. 4006-4017, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.7019>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.7019>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SPARKS, T. C.; CROSTHWAITE, A. J.; NAUEN, R.; BANBA, S.; CORDOVA, D.; EARLEY, F.; EBBINGHAUS-KINTSCHER, U.; FUJIOKA S.; HIRAO, A.; KARMON, D.; KENNEDY, R.; NAKAO, T.; POPHAM, H. J. R.; SALGADO, V.; WATSON, G. B.; WEDEL, B. J.; WESSELS, F. J. Insecticides, biologics and nematicides: Updates to IRAC's mode of action classification-a tool for resistance management. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 167, p. 104587, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104587>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048357520300821?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2024.

UMETSU, N.; SHIRAI, Y. Development of novel pesticides in the 21st century. **Journal of Pesticide Science**, v. 45, p. 54-74, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1584/jpestics.D20-201>. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jpestics/45/2/45_D20-201/_article. Acesso em: 25 jan. 2024.

WEDDING, R. T. Plant physiological aspects of the use of systemic insecticides. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 1, p. 832-834, 1953. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf60013a004>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf60013a004>. Acesso em: 25 jan. 2024.

WULFF, J. A.; KIANI, M.; REGAN, K.; EUBANKS, M. D.; SZCZEPANIEC, A. Neonicotinoid insecticides alter the transcriptome of soybean and decrease plant resistance. **International journal of molecular sciences**, v. 20, p. 783, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20030783>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/3/783>. Acesso em: 25 jan. 2024.

YANG, T.; LIAN, Y.; WANG, C. Comparing and contrasting the multiple roles of butenolide plant growth regulators: strigolactones and karrikins in plant development and adaptation to abiotic stresses. **International journal of molecular sciences**, v. 20, p. 6270, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20246270>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/24/6270>. Acesso em: 25 jan. 2024.

YENGGOKPAM, P.; MAZUMDER, P. B. Phytotoxicity of malathion (PM) and tatafen (PTF) towards *Solanum melongena* L. cv. Longai: a case study. **Plant Physiology**, v. 25, p. 149-156, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40502-019-00498-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40502-019-00498-0>. Acesso em: 25 jan. 2024.

ZHANG, Q.; TANG, J.; GAO, B.; QU, C.; WANG, J.; LUO, C.; WANG, R. Overexpression of CYP6CX4 contributing to field-evolved resistance to flupyradifurone, one novel butenolide insecticide, in *Bemisia tabaci* from China. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 265, p. 131056, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131056>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813024018610>. Acesso em: 25 jan. 2024.

Capítulo 1

Inseticidas via solo, mortalidade do bicho-mineiro-do-cafeeiro e morfofisiologia de *Coffea arabica* L.

Resumo

É compartilhado por cafeicultores a hipótese de que inseticidas usados no controle de bicho-mineiro possuam atividade bioativadora sobre o cafeeiro. Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito de inseticidas sobre a morfofisiologia de mudas de café e a infestação por bicho-mineiro. Para tanto, inseticidas tiametoxam, dinotefuram, dinotefuram+piriproxifem, imidacloprido e flupiradifurona foram aplicados via solo em mudas. Foram realizados cinco bioensaios, aos 10, 20, 40, 60 e 80 dias após a aplicação. Em cada um, quatro mudas foram selecionadas e foram mensurados o diâmetro do caule, número de folhas, área foliar e massa seca infestada pelo bicho-mineiro. No sistema radicular foram avaliados o diâmetro, o volume, a área e massa seca das raízes. Também, aos 10, 20 e 40 dias, as trocas gasosas das mudas foram avaliadas. Os inseticidas não alteraram as trocas gasosas das mudas em nenhum bioensaio. O inseticida à base de imidacloprido provocou redução da altura e área foliar das mudas aos 60 e 80 dias. Aos 80 dias, o imidacloprido provocou declínio da massa seca do caule. O tiametoxam 250 g i.a ha⁻¹ aumentou o volume e área das raízes das mudas aos 80 dias, porém, o imidacloprido provocou redução da massa seca das raízes aos 80 dias. Os inseticidas foram eficazes na proteção das mudas nos bioensaios. Os inseticidas não possuem propriedade bioativadora do desenvolvimento aéreo. O tiametoxam 250 possui efeito bioativador no volume e área de raízes. Os inseticidas protegem mudas de café dos 10 até os 80 dias.

Palavras-chave: *Leucoptera coffeella*; controle químico; bioativador; biometria; café arábica.

Chapter 1

Insecticides via soil, mortality of the coffee leaf miner and morphophysiology of *Coffea arabica* L.

Abstracts

The hypothesis that insecticides used to control leaf miner have bioactivating activity on the coffee plant is shared by coffee growers. Thus, the objective of the present study was to evaluate the effect of insecticides on the morphophysiology of coffee seedlings and leaf miner infestation. To this end, insecticides thiamethoxam, dinotefuram, dinotefuram+pyriproxifen, imidacloprid and flupyradifurone were applied via soil to seedlings. Five bioassays were carried out, at 10, 20, 40, 60 and 80 days after application. In each one, four seedlings were selected and the stem diameter, number of leaves, leaf area and leaf miner infestation were measured in the aerial part. In the root system, the diameter, volume, area and dry mass of the roots and shoots were evaluated. Also, at 10, 20 and 40 days after application of the insecticides, the gas exchange of the seedlings was evaluated. The insecticides did not alter the gas exchange of the seedlings in any bioassay. The imidacloprid-based insecticide caused a reduction in the height and leaf area of the seedlings at 60 and 80 days. At 80 days, imidacloprid caused a decline in the dry mass of the stem. Thiamethoxam 250 g i.a ha⁻¹ increased the volume and area of the roots of the seedlings at 80 days, however, imidacloprid caused a reduction in the dry mass of the roots at 80 days. Insecticides were effective in protecting seedlings in bioassays. Insecticides do not have the bioactivating property of aerial development. Thiamethoxam 250 has a bioactivating effect on root volume and area. Insecticides protect coffee seedlings from 10 to 80 days old.

Keywords: *Leucoptera coffeella*; chemical control; bioactivator; biometry; Arabica coffee.

1 Introdução

Uma preocupação crescente em relação ao uso de inseticidas é a ideia de que essas moléculas promovem o crescimento vegetal, agindo como um bioativador do desenvolvimento das plantas (Stamm et al., 2014). Essa percepção compartilhada por agricultores pode encorajar o uso desnecessário destes inseticidas, aumentando a pressão de seleção genética, conseqüentemente, a um eventual declínio em sua eficiência, aumentando os riscos ambientais e para saúde humana (Klingelhöfer et al., 2022; Leite et al., 2022). No entanto, é importante notar que essa percepção sobre o aumento do vigor das plantas não é totalmente infundada (Zhou et al., 2014). Os inseticidas em geral podem afetar diretamente a fisiologia e a bioquímica das plantas; a translocação de inseticidas, em particular, pode afetar o metabolismo secundário, afetando assim o crescimento (Li et al., 2021; Shahid, Singh, Khan, 2023).

Alguns inseticidas têm o potencial de estimular a germinação das sementes, promover o desenvolvimento das raízes, incrementar a altura das plântulas, aumentar a produção de biomassa e elevar o rendimento das culturas, ao mesmo tempo em que fortalecem a capacidade das plantas de resistir aos estresses ambientais (Afifi et al., 2015; Guedes et al., 1996; Larsen e Falk, 2013; Silva et al., 2022). Essas descobertas foram documentadas em diversas espécies de plantas, como arroz, trigo, milho, soja e cana-de-açúcar (Larsen; Falk, 2013; Lanka et al., 2017; Salgado, 1998; Silva et al., 2022; Zuim et al., 2021). No cafeeiro, os inseticidas químicos prevalecem no controle de algumas pragas importantes, como o bicho-mineiro-do-cafeeiro (Leite et al., 2020; Leite et al., 2021; Leite et al., 2022).

O bicho-mineiro-do-cafeeiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville e Perrottet) (Lepidoptera: Lyonetiidae), é umas das principais pragas do cafeeiro devido à sua alta voracidade e ao seu potencial de causar danos econômicos significativos. Os prejuízos resultam das lesões provocadas pelas lagartas, que se alimentam do tecido foliar e do parênquima paliádico da planta, resultando em uma redução na produção de frutos. Em países produtores da região neotropical foram relatadas perdas na produtividade de grãos de café de até 87%, variando de acordo com a época; em condições de seca e alta densidade, a desfolha pode atingir até 75% (Dantas et al., 2021; Motta et al., 2021; Ramiro et al., 2004; Walerius et al., 2023).

O controle químico, sendo o método mais comum, pode exigir até 20 aplicações por ano para reduzir as populações do inseto (Leite et al., 2020). Existem 166 produtos registrados para controle do bicho-mineiro, a maioria dos quais são inseticidas neurotóxicos. Os

neonicotinoides são destacados como um dos principais grupos químicos utilizados na agricultura para esse fim (Klingelhöfer et al., 2022). Os princípios ativos deste grupo podem causar danos ao DNA, apoptose, oxidação de proteínas, inibição da respiração mitocondrial e indução da produção de espécies reativas de oxigênio em insetos (Xu et al., 2022). Portanto, os neurotóxicos apresentam riscos à segurança dos ecossistemas e à saúde humana, sendo objeto de preocupação da comunidade científica quanto aos efeitos nocivos (Rondeau; Raine, 2024; Shi et al., 2024; Thompson et al., 2020; Xu et al., 2021).

A dependência do uso de inseticidas para o manejo do bicho-mineiro-do-cafeeiro levanta preocupações sobre a evolução da resistência aos inseticidas nas populações dessa espécie (Leite et al., 2020). Já foram identificadas populações de bicho-mineiro resistentes a organofosforados (clorpirifós), a neonicotinoides (tiametoxam) e diamidas (clorantraniliprole) em diferentes estados produtores (Leite et al., 2020a; Leite et al., 2021). A situação em relação a outros inseticidas comumente utilizados permanece incerta (Leite et al., 2021). Essa situação pode ser agravada pela ideia de que tais moléculas sejam fitotônicas e os produtores apliquem doses esperando esse suposto efeito adjacente (Leite et al., 2022).

Até o momento, pesquisas indicam que os sistemas antioxidantes e as vias ligadas ao ácido salicílico são importantes nos efeitos estimulantes das plantas causados por inseticidas. Esses sistemas podem afetar outras vias, como as relacionadas ao jasmonato (Ford et al., 2010; Khurshid et al., 2024; House; Swanton; Lukens, 2021; Shi et al., 2021; Wulff et al., 2019). A primeira evidência fisiológica da ativação biológica dos neonicotinoides surgiu ao revelar o papel desse grupo de inseticidas na indução de respostas de defesa de plantas relacionadas ao salicilato, utilizando a planta modelo *Arabidopsis thaliana* L. (Ford et al., 2010).

No cafeeiro, doses baixas de certos inseticidas demonstram efeitos semelhantes aos de biorreguladores recomendados para fases iniciais do café. No entanto, os estudos sobre as propriedades estimulantes dos inseticidas sobre o desenvolvimento de plantas de cafeeiro e sua eficiência no controle do bicho-mineiro são escassos, uma vez que os pesquisadores geralmente enfatizam as alterações morfofisiológicas observadas em plantas tratadas com os inseticidas (Leite et al., 2022). Considerando a importância econômica do cafeeiro para nosso país, a alta voracidade, os danos econômicos provocados pelo bicho-mineiro e os riscos decorrentes do uso inadequado de inseticidas, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de inseticidas à base de tiametoxam (neonicotinoide), dinotefuram (neonicotinoide), imidacloprido (neonicotinoide), dinotefuram + piriproxifem (neonicotinoide + éter piridiloxipropílico) e flupiradifurona (butenolida) sobre o desenvolvimento morfológico,

trocas gasosas e a eficiência no controle de bicho-mineiro desses inseticidas em mudas de café Catuaí Vermelho IAC 144.

2 Material e Métodos

2.1 Condução das mudas e aplicação dos inseticidas

Os bioensaios foram conduzidos na casa-de-vegetação na área experimental do *Campus* Rio Paranaíba da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Para tanto, mudas de café Catuaí Vermelho IAC 144 foram transplantadas para vasos plásticos de 3,8 L, utilizado terra de barranco como substrato. As mudas foram acomodadas em sete gaiolas entomológicas (1,30 x 2,00 x 1,00 m), uma gaiola por tratamento. Após 30 dias dos transplantes, as mudas receberam seis tratamentos, compostos por inseticidas à base de tiametoxam (neonicotinoide), dinotefuram (neonicotinoide), dinotefuram + piriproxifem (neonicotinoide + éter piridiloxipropílico), imidacloprido (neonicotinoide), flupiradifurona (butenolida) e um tratamento controle de água. As doses aplicadas seguiram as recomendações para mudas de café das bulas cadastradas no do Sistema Agrofit (2023) (Tabela 1).

Para aplicação dos inseticidas, as mudas foram mantidas sem irrigação por 24 horas. Posteriormente, os inseticidas foram aplicados simulando o método do *Dench*, sendo aplicados no solo sob a copa das mudas em volume de calda de 50 ml por mudas. Após a aplicação dos inseticidas, as mudas foram mantidas sem irrigação por 24 horas, sendo retomados os tratos culturais após esse período. A irrigação foi realizada diariamente com a aplicação de 50 ml de água por muda seguindo a capacidade de campo dos vasos.

Tabela 1- Grupo químico, ingrediente ativo, concentração, formulação dos inseticidas utilizados no bioensaio

| Grupo Químico | Ingrediente ativo | Concentração g i.a ha ⁻¹ * | Formulação | Volume de calda (ml) |
|---|-------------------------------|--|------------|-------------------------|
| Neonicotinoide | Tiametoxam | 250 | WG | 50 |
| Butenolida | Flupiradifurona | 300 | SL | 50 |
| Neonicotinoide | Dinotefuram | 175 | SC | 50 |
| Neonicotinoide | Tiametoxam | 300 | WG | 50 |
| Neonicotinoide | Imidaclopride | 140 | WG | 50 |
| Neonicotinoide + Éter Piridiloxipropílico | Dinotefuram + Piriproxifem | 150 + 37,5 | EW | 50 |

Fonte: O autor.

*Gramas de ingrediente ativo por hectare.

2.1 Avaliações da fisiologia da fotossíntese das mudas

A cada 10, 20 e 40 dias, quatro mudas em cada gaiola foram sorteadas para realização de análises das trocas gasosas por meio de medições com o IRGA (Photosynthesis System, Make LI-COR USA, Model LI6400), cada muda se consistia em uma repetição. As análises foram conduzidas pela manhã, em condições climáticas estáveis, sem a presença de nuvens ou ventos fortes. As medições foram realizadas em único ponto na folha do terceiro par do ápice das mudas. Foram mensuradas a taxa de assimilação líquida de CO₂ (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}^1$), a condutância estomática ao vapor de água (G_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^1$), a taxa de transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^1$) e a taxa de transporte de elétrons (ETR) ($\mu\text{mol (elétrons) m}^2/\text{s}^1$).

2.3 Desenvolvimento da parte aérea das mudas tratadas com inseticidas sistêmicos via solo

A cada 10, 20, 40, 60 e 80 dias após a aplicação dos inseticidas, quatro mudas em cada gaiola foram sorteadas, sendo cada muda uma repetição, para análises dos parâmetros biométricos, as análises foram destrutivas. Foram mensurados o diâmetro do caule (mm), utilizando um paquímetro digital na altura de 5 cm contando da base das plantas; a altura das plantas (cm), mensurada da base da planta até o ápice das mudas; o número total de folhas (n); a área foliar obtida pela mensuração da largura (cm) e o comprimento das folhas (cm) do terceiro par de folhas contados do ápice das mudas com auxílio de uma régua milimétrica. Os dados de largura e comprimento das folhas foram submetidos a cálculo de regressão $Y=$

$2,2443+0,6373(C*L)$ ($R=96\%$), proposto por Schmildt et al. (2014) para estimar a área foliar. Após as análises dos parâmetros biométricos das mudas, estas foram encaminhadas para realização das análises de eficiência dos inseticidas.

2.4 Eficiência dos inseticidas sobre bicho-mineiro-do-cafeeiro

Após a avaliação dos parâmetros biométricos, as quatro mudas de cada tratamento foram transferidas para gaiolas de criação (60 x 20 x 20 cm), cada gaiola com um tratamento, onde foram liberados 40 adultos de bicho-mineiro por mudas, assim uma proporção de (10:1). Os insetos foram provenientes da criação mantida sob as mesmas condições na casa de vegetação. Eles foram criados sobre mudas de Catuaí Vermelho IAC 144 e a dieta para adultos foi composta de mel a 10%. Os insetos permaneceram nas gaiolas por até dois dias; ao final desse período os adultos foram retirados e os ovos dos insetos foram contabilizados. Em cada muda (repetição) foram selecionados 30 ovos e o restante foi removido com auxílio de pincel de pintura nº 2. Três dias após a emergência das lagartas foram contabilizados o número de lagartas sobreviventes em cada muda. Em seguida, foi realizada a avaliação do desenvolvimento das raízes e acúmulo de massa seca das mudas.

2.5 Acúmulo de massa seca das mudas e desenvolvimento das raízes

Após a avaliação da eficiência dos inseticidas foram avaliadas a massa seca da parte aérea e da parte radicular das quatro mudas por cada tratamento. Para avaliação da massa seca da parte aérea das mudas, as folhas e os caules foram extraídos, pesados e depositados em sacos de papel com capacidade para 5 kg. Em seguida, foram secos a 65°C em estufa de circulação forçada de ar até obtenção de massa constante. Após isso, foram registrados os pesos do caule e das folhas secas.

Para avaliação da massa seca das raízes das mudas, estas foram cuidadosamente retiradas dos vasos das plantas. Os vasos foram submersos em balde contendo água e o substrato foi removido cuidadosamente utilizando água corrente. As raízes foram então etiquetadas e levadas ao Centro Integrado de Pesquisa, onde toda a sujidade foi removida e as raízes foram secas em temperatura ambiente. Posteriormente, foram pesadas e fotografadas com aparelho Scan Deskjet (2,400 dpi, 48 bits de cores, Fotográfico - L2734A). As raízes foram acondicionadas em sacos de papel perfurados de 5 kg e secas em estufa de circulação forçada de ar até a manutenção de peso constante.

As fotografias das raízes foram submetidas ao software SAFIRA® (Embrapa, 2009) onde foi calculado diâmetro (mm), diâmetro ponderado, número de raízes finas (n), área total (cm²) e o volume total (mm³) das raízes por meio da segmentação das imagens.

2.6 Análises dos dados

O delineamento de todos os bioensaios foi o inteiramente casualizados com quatro repetições em cada tratamento. Os dados biométricos das mudas - altura (cm), diâmetro do caule, o número de folhas, a área foliar (cm²), a massa seca do caule (g), a massa seca das folhas (g), massa seca das raízes (g) e diâmetro das raízes (mm), número de fibras (n), área total (cm²) e volume total (cm³) das raízes - foram submetidos a análises de normalidade do resíduo por Shapiro-Wilk e homogeneidade de variância por Bartlett ($P < 0,05$). Sob o pressuposto de normalidade e homogeneidade, os dados foram submetidos a análises de variância e, confirmada a significância, foram submetidos ao teste de média de Tukey ($P < 0,05$), usando o software R versão 4.2.1 (R CORE TEAM, 2022).

3 Resultados

3.1 Fisiologia das mudas

Não foram detectadas diferenças significativas em nenhuma das variáveis fisiológicas medida nos bioensaios. Aos 10 dias após a aplicação (DAA) não ocorreram diferenças na taxa de assimilação líquida de CO₂ (A) ($F_{(6;21)} = 0,630$; $P = 0,704$) (4,62 a 6,61 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}^1$), na condutância estomática (Gs), ($F_{(6;21)} = 0,000$; $P = 0,867$) (0,04 a 0,06 $\text{mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^1$), na taxa de transpiração (E) ($F_{(6;21)} = 0,420$; $P = 0,821$) (0,98 a 1,66 $\text{m, mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^1$) e na taxa de transporte de elétrons (ETR) ($F_{(6;21)} = 0,721$; $P = 0,606$) (64,13 a 73,81 $\square\text{mol (elétrons) m}^2/\text{s}^1$).

Aos 20 DAA não ocorreram diferenças significativas entre as mudas que receberam os inseticidas e as mudas controle na taxa de assimilação líquida de CO₂ ($F_{(6;21)} = 0,106$; $P = 0,994$) (3,33 a 4,84 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}^1$), na condutância estomática ($F_{(6;21)} = 1,453$; $P = 0,241$) (0,02 a 0,06 $\text{mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^1$), na taxa de transpiração ($F_{(6;21)} = 2,289$ $P = 0,073$) (0,75 a 1,28 $\text{m, mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^1$) e na taxa de transporte de elétrons ($F_{(6;21)} = 0,260$ $P = 0,949$) (72,28 a 77,93 $\text{m, mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^1$).

Aos 40 DAA também não foram identificadas diferenças significativas sobre a taxa de assimilação líquida de CO₂ ($F_{(6;21)}= 0,671$; $P= 0,673$) (6,15 a 10,39 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}^1$), a condutância estomática ($F_{(6;21)}= 1,286$; $P= 0,305$) (0,03 a 0,06 mol H₂O m^2/s^1), a taxa de transpiração ($F_{(6;21)}= 1,105$; $P=0,392$) (0,64 a 1,33 mol H₂O m^2/s^1) e a taxa de transporte de elétrons ($F_{(6;21)}=0,663$; $P=0,679$) (54,42 a 67,02 $\mu\text{mol (elétrons) m}^2/\text{s}^1$).

3.2 Desenvolvimento da parte aérea das mudas

As variáveis altura ($F_{(6;21)}=0,461$; $P=0,829$), diâmetro do caule ($F_{(6;21)}=0,210$; $P=0,968$), número de folhas ($F_{(6;21)}=0,361$; $P=0,894$), área foliar ($F_{(6;21)}=1,039$; $P=0,428$), massa seca do caule ($F_{(6;21)}=0,372$; $P=0,889$) e das folhas ($F_{(6;21)}=2,421$; $P= 0,061$) das mudas tratadas com os inseticidas não foram afetadas pelos inseticidas aos 10 DAA (Tabela 2).

Aos 20 DAA, as variáveis de altura ($F_{(6;21)}=1,111$; $P=0,386$), diâmetro do caule ($F_{(6;21)}= 0,597$; $P= 0,729$), número de folhas ($F_{(6;21)}=1,822$; $P=0,142$), área foliar ($F_{(6;21)}=0,845$; $P=0,549$), massa seca do caule ($F_{(6;21)}=1,260$; $P= 0,316$) e massa seca das folhas ($F_{(6;21)}=2,491$; $P=0,055$) das mudas não foram alterados pela aplicação dos inseticidas (Tabela 2).

Após 40 DAA, a altura ($F_{(6;21)}=2,691$; $P=0,042$), diâmetro do caule ($F_{(6;21)}=1,281$; $P=0,305$), número de folhas ($F_{(6;21)}=0,760$; $P=0,607$), área foliar ($F_{(6;21)}=1,120$; $P=0,383$), massa seca do caule ($F_{(6;21)}=0,471$; $P=0,822$) e a massa seca das folhas das mudas ($F_{(6;21)}=2,290$; $P=0,0733$) tratadas com inseticidas também foram semelhantes ao controle (Tabela 2).

Aos 60 DAA, os inseticidas a base de tiametoxam 300 g i.a ha⁻¹ (Tiam. 300) e imidacloprido (Imid.) afetaram negativamente a altura das mudas ($F_{(6;21)}=4,951$; $P= 0,002$). Além disso, o imidacloprido (Imid.) também afetou negativamente a área foliar das mudas ($F_{(6;21)}=3,461$; $P=0,015$), resultando na redução da mesma comparadas com os outros inseticidas e o tratamento controle (Tabela 3). No entanto, o diâmetro do caule ($F_{(6;21)} =2,222$; $P= 0,081$), o número de folhas ($F_{(6;21)}=0,509$; $P=0,794$) e a massa seca do caule ($F_{(6;21)}=0,761$; $P=0,608$) e o rendimento de massa seca das folhas ($F_{(6;21)}=2,577$; $P=0,0499$) não foram afetados pela aplicação dos inseticidas (Tabela 2).

Aos 80 dias após a aplicação dos inseticidas, a altura ($F_{(6;21)}=7,39$; $P=0,0002$), a área foliar ($F_{(6;21)}=16,790$; $P=4,935$) e a massa seca do caule das mudas ($F_{(6;21)}=4,601$; $P=0,003$) foram negativamente afetados pelo inseticida a base de imidacloprido. Ademais, o Tiam. 300

também afetou negativamente a área foliar, porém não foi diferente do tratamento com Imid. No entanto, o diâmetro do caule ($F_{(6;21)}=2,161$; $P=0,088$), o número de folhas ($F_{(6;21)}=1,284$; $P=0,307$) e a massa seca das folhas ($F_{(6;21)}=2,511$; $P=0,054$) não foram afetados pelas aplicações dos inseticidas aos 80 dias (Tabela 2).

Tabela 2- Altura (cm), diâmetro (\varnothing mm), número das folhas, área foliar (cm^2) e massa seca (g) da parte aérea de mudas de café tratado com inseticidas sistêmicos via solo 10, 20, 40, 60 e 80 dias após a aplicação

| Tratamento | Alt. (cm) | \varnothing (mm) | Nfol (n) | Área F (cm^2) | Massa seca | |
|---------------|-----------|--------------------|----------|--------------------------|------------|------------|
| | | | | | Caule (g) | Folhas (g) |
| 10 dias | | | | | | |
| Controle | 30,63a | 4,65a | 15,00a | 52,21a | 2,52a | 5,20a |
| Tiam. 250 | 30,63a | 4,93a | 16,00a | 59,83a | 2,60a | 5,39a |
| Flup. | 27,63a | 5,13a | 16,25a | 46,95a | 1,96a | 2,55a |
| Imid. | 32,50a | 4,51a | 15,50a | 67,85a | 2,77a | 5,24a |
| Dino. | 32,13a | 4,72a | 15,50a | 49,41a | 2,70a | 6,25a |
| Tiam. 300 | 31,75a | 4,58a | 14,00a | 41,52a | 2,59a | 5,32a |
| Dino. + Piri. | 31,38a | 4,82a | 16,25a | 49,12a | 2,34a | 5,10a |
| CV(%) | 15,48 | 19,51 | 17,21 | 32,85 | 36,00 | 29,46 |
| 20 dias | | | | | | |
| Controle | 37,88a | 4,94a | 19,25a | 83,92a | 4,07a | 7,49a |
| Tiam. 250 | 37,13a | 4,58a | 18,75a | 82,71a | 3,45a | 7,05a |
| Flupi. | 36,88a | 5,10a | 22,25a | 76,75a | 3,95a | 7,80a |
| Imid. | 33,75a | 4,56a | 17,00a | 83,03a | 2,98a | 5,41a |
| Dino. | 36,75a | 4,71a | 18,75a | 89,65a | 3,90a | 7,42a |
| Tiam. 300 | 33,75a | 5,10a | 19,00a | 76,26a | 3,60a | 6,19a |
| Dino. + piri. | 35,25a | 4,72a | 19,25a | 68,72a | 3,25a | 6,60a |
| CV(%) | 8,81 | 11,99 | 12,03 | 18,43 | 19,85 | 15,56 |
| 40 dias | | | | | | |
| Controle | 42,10a | 5,86a | 24,00a | 82,21a | 5,69a | 9,75a |
| Tiam. 250 | 40,08a | 6,29a | 24,50a | 84,90a | 5,58a | 10,97a |
| Flupi. | 42,06a | 5,78a | 24,75a | 88,03a | 5,57a | 9,74a |
| Imid. | 37,25a | 6,58a | 28,50a | 83,91a | 6,20a | 9,69a |
| Dino. | 41,25a | 6,32a | 24,50a | 84,78a | 5,89a | 9,40a |
| Tiam. 300 | 36,25a | 5,98a | 24,25a | 68,57a | 5,23a | 7,24a |
| Dino. + piri. | 40,65a | 6,28a | 27,25a | 92,77a | 5,62a | 9,69a |
| CV(%) | 7,07 | 8,26 | 15,78 | 16,87 | 15,5 | 15,53 |
| 60 dias | | | | | | |
| Controle | 46,03ab | 7,58a | 36,25a | 84,35a | 7,84a | 13,54a |
| Flupi. | 46,25a | 6,54a | 35,50a | 79,23a | 7,93a | 11,24a |
| Dino. + piri. | 46,28a | 6,92a | 35,50a | 81,36a | 8,47a | 11,80a |
| Dino. | 44,63abc | 6,70a | 33,75a | 78,89a | 7,81a | 12,63a |
| Tiam. 250 | 44,45abc | 7,41a | 31,75a | 82,11a | 7,21a | 11,64a |
| Tiam. 300 | 41,00bc | 7,28a | 31,50a | 63,30a | 7,61a | 9,12a |
| Imid. | 40,00c | 6,40a | 37,25a | 47,04b | 6,20a | 8,90a |
| CV(%) | 5,18 | 8,79 | 18,09 | 19,89 | 21,58 | 18,97 |
| 80 dias | | | | | | |
| Controle | 48,13a | 7,89a | 32,25a | 91,77a | 10,89a | 12,70a |
| Tiam. 250 | 47,88a | 7,83a | 38,00a | 83,07a | 10,09ab | 12,79a |
| Flupi. | 47,88a | 8,00a | 40,00a | 78,57a | 10,85a | 13,04a |
| Dino. | 47,63a | 8,27a | 39,50a | 73,42a | 11,27a | 13,81a |
| Dino. + piri. | 45,63a | 7,28a | 35,75a | 83,60a | 10,43ab | 13,59a |
| Tiam. 300 | 40,38ab | 7,25a | 32,50a | 41,43b | 8,74ab | 10,60a |
| Imid. | 40,00b | 7,33a | 34,75a | 32,89b | 7,58b | 9,94a |
| CV(%) | 5,89 | 7,22 | 15,48 | 16,03 | 12,49 | 15,24 |

Fonte: O autor.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade aos 10, 20, 40, 60 e 80 dias. Alt.: altura das mudas; \varnothing : diâmetro do caule; Nfol: Número de folhas; Área F: área foliar; Tiam. 250: tiametoxam 250 g i.a ha^{-1} . Flup.: flupiradifurona. Imid.: imidacloprido; Dino.: dinotefuram; Tiam. 300: tiametoxam 300 g i.a ha^{-1} ; Dino. + Piri.: dinotefuram + piriproxifem. Controle: Água

3.3 Sistema radicular

Os inseticidas não provocaram alterações nos parâmetros avaliados do sistema radicular das mudas 10 dias após as aplicações. O diâmetro (\varnothing) ($F_{(6;21)}=0,16952$; $P=0,9822$), o diâmetro ponderado (\varnothing Pon) ($F_{(6;21)}=0,591$; $P=0,733$), o número de raízes finas (N de raízes finas) ($F_{(6;21)}=0,036$; $P=0,999$), a área ocupada ($F_{(6;21)}=0,792$; $P=0,586$), o volume ($F_{(6;21)}=0,064$; $P=0,998$) e a massa seca das raízes das mudas ($F_{(6;21)}=1,100$; $P=0,394$) que receberam a aplicação de inseticidas foram iguais as das mudas que não receberam inseticidas (Tabela 3).

Aos 20 DAA, nenhum parâmetro avaliado no sistema radicular das mudas diferiu das mudas do tratamento controle. O diâmetro (\varnothing) ($F_{(6;21)}=0,96872$; $P=0,469$), o diâmetro ponderado (\varnothing Pon) ($F_{(6;21)}=1,752$; $P=0,157$), número de raízes finas ($F_{(6;21)}=1,932$; $P=0,122$), a área ocupada ($F_{(6;21)}=1,882$; $P=0,131$), o volume ($F_{(6;21)}=0,832$; $P=0,553$) e a massa seca das raízes das mudas ($F_{(6;21)}=1,422$; $P=0,250$) foram iguais em todos os tratamentos (Tabela 3).

Os inseticidas aplicados não provocaram nenhuma alteração nos parâmetros avaliados no sistema radicular das mudas aos 40 dias após a aplicação (Tabela 3). O diâmetro (\varnothing) ($F_{(6;21)}=0,800$; $P=0,576$), o diâmetro ponderado (\varnothing Pon) ($F_{(6;21)}=1,661$; $P=0,180$), o número de raízes finas ($F_{(6;21)}=0,961$; $P=0,472$), a área ocupada ($F_{(6;21)}=0,931$; $P=0,491$), o volume ($F_{(6;21)}=1,331$; $P=0,286$) e a massa seca das raízes das mudas ($F_{(6;21)}=0,110$; $P=0,993$) foram iguais em todos os tratamentos avaliados.

Aos 60 DAA, não foram verificadas diferença entre o diâmetro ($F_{(6;21)}=1,30$; $P=0,298$), diâmetro ponderado ($F_{(6;21)}=0,29$; $P=0,933$), número de raízes finas ($F_{(6;21)}=0,50$; $P=0,799$), área ($F_{(6;21)}=1,31$; $P=0,295$), volume ($F_{(6;21)}=0,60$; $P=0,723$) e massa seca das raízes das mudas ($F_{(6;21)}=1,17$; $P=0,355$) tratadas com inseticidas ou tratamento controle (Tabela 3).

A área ocupada ($F_{(6;21)}=8,321$; $P=0,0001$), o volume ($F_{(6;21)}=5,360$; $P=0,001$) e a massa seca das raízes ($F_{(6;21)}=2,611$; $P=0,047$) foram influenciadas pela aplicação dos inseticidas nos bioensaios com 80 dias após a aplicação dos inseticidas (Tabela 3). As mudas tratadas com o inseticida Tiam 250 apresentaram a maior área ocupada pelas raízes, superando mais que o dobro da área das raízes das mudas do tratamento controle. O maior volume de raízes foi obtido nas mudas tratadas com o inseticida à base de Tiam 250, os volumes das mudas tratadas com os outros inseticidas foram iguais ao das mudas do

tratamento controle. A maior massa seca das raízes foi obtida nas mudas tratadas com inseticida Flup. e o menor em mudas tratadas com Imid, porém ambos foram iguais ao controle.

Tabela 3- Diâmetro (\varnothing mm), diâmetro ponderado (mm), número de raízes finas, área (cm^2), volume (cm^3) e massa seca (g) radicular de mudas de cafeeiro tratadas com inseticidas sistêmicos via solo 10, 20, 40, 60 e 80 dias após a aplicação

| Tratamento | \varnothing (mm) | \varnothing Pon (mm) | N de raízes finas (n) | Área (cm^2) | Volume (cm^3) | Masa seca (g) |
|---------------|--------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|---------------|
| 10 dias | | | | | | |
| Tiam. 250 | 9,11a | 1,14a | 146,50a | 39206,86a | 22,56a | 1,80a |
| Flupi. | 8,28a | 1,09a | 154,25a | 37577,14a | 23,65a | 1,39a |
| Dino. + piri. | 8,89a | 1,19a | 151,75a | 47142,85a | 26,35a | 2,40a |
| Tiam. 300 | 8,10a | 1,32a | 146,50a | 26651,75a | 23,24a | 2,10a |
| Dino. | 8,11a | 1,15a | 139,25a | 39258,33a | 21,89a | 2,43a |
| Imid. | 8,75a | 1,26a | 143,00a | 51625,68a | 25,39a | 2,45a |
| Controle | 8,46a | 1,39a | 143,25a | 77080,39a | 25,34a | 2,05a |
| CV(%) | 22,54 | 22,48 | 37,44 | 18,97 | 54,28 | 35,76 |
| 20 dias | | | | | | |
| Tiam. 250 | 9,33a | 1,84a | 215,75a | 25838,41a | 24,28a | 2,60a |
| Flupi. | 9,85a | 1,50a | 281,50a | 43256,37a | 25,76a | 2,93a |
| Dino. + piri. | 10,80a | 1,14a | 211,25a | 51706,08a | 29,56a | 2,05a |
| Tiam. 300 | 9,41a | 1,22a | 170,00a | 61655,32a | 17,07a | 2,59a |
| Dino. | 8,44a | 1,19a | 239,50a | 51173,15a | 24,36a | 2,80a |
| Imid. | 8,79a | 1,30a | 182,00a | 29691,41a | 15,32a | 1,98a |
| Controle | 9,67a | 1,39a | 136,00a | 54328,35a | 26,23a | 2,87a |
| CV(%) | 16,7 | 26,8 | 33,54 | 42,5 | 48,29 | 26,18 |
| 40 dias | | | | | | |
| Tiam. 250 | 12,58a | 1,22a | 160,50a | 92620,66a | 68,52a | 4,01a |
| Flupi. | 11,84a | 1,20a | 188,75a | 69023,53a | 48,13a | 3,84a |
| Dino. + piri. | 12,26a | 1,15a | 174,25a | 93815,53a | 51,75a | 3,78a |
| Tiam. 300 | 11,98a | 1,28a | 138,75a | 76593,48a | 62,28a | 3,72a |
| Dino. | 10,65a | 1,23a | 172,25a | 76979,13a | 45,35a | 3,50a |
| Imid. | 11,09a | 1,22a | 168,25a | 66150,71a | 34,71a | 3,53a |
| Controle | 11,18a | 1,23a | 136,00a | 53181,27a | 37,89a | 3,71a |
| CV(%) | 13,35 | 5,37 | 24,11 | 39,72 | 42,64 | 27,8 |
| 60 dias | | | | | | |
| Tiam. 250 | 13,13a | 1,21a | 202,00a | 95808,42a | 57,98a | 5,05a |
| Flup. | 12,62a | 1,23a | 192,25a | 73735,04a | 46,80a | 5,47a |
| Dino. + Piri. | 13,26a | 1,25a | 185,25a | 81629,47a | 53,86a | 4,42a |
| Tiam. 300 | 12,74a | 1,22a | 191,50a | 109316,89a | 65,00a | 5,51a |
| Dino. | 11,51a | 1,24a | 184,00a | 89565,19a | 54,01a | 4,64a |
| Imid. | 12,03a | 1,25a | 186,25a | 75826,82a | 45,59a | 4,04a |
| Controle | 13,29a | 1,22a | 171,00a | 96156,41a | 58,91a | 5,48a |
| CV(%) | 9,29 | 4,74 | 14,28 | 25,01 | 32,25 | 22,02 |
| 80 dias | | | | | | |
| Tiam. 250 | 13,62a | 1,27a | 146,50a | 145602,00a | 107,55a | 6,74ab |
| Flupi. | 13,29a | 1,29a | 150,75a | 130789,60ab | 89,06ab | 7,29a |
| Dino. + piri. | 13,97a | 1,28a | 205,25a | 90559,43bc | 67,35ab | 6,07ab |
| Tiam. 300 | 13,47a | 1,22a | 157,50a | 82002,79bc | 52,55b | 5,79ab |
| Dino. | 13,21a | 1,23a | 152,25a | 74974,90c | 52,15b | 6,11ab |
| Imid. | 12,61a | 1,32a | 149,00a | 68878,21c | 51,28b | 3,99b |
| Controle | 13,95a | 1,30a | 195,75a | 64177,68c | 48,23b | 6,77ab |
| CV(%) | 9,70 | 4,90 | 19,32 | 23,47 | 29,64 | 20,90 |

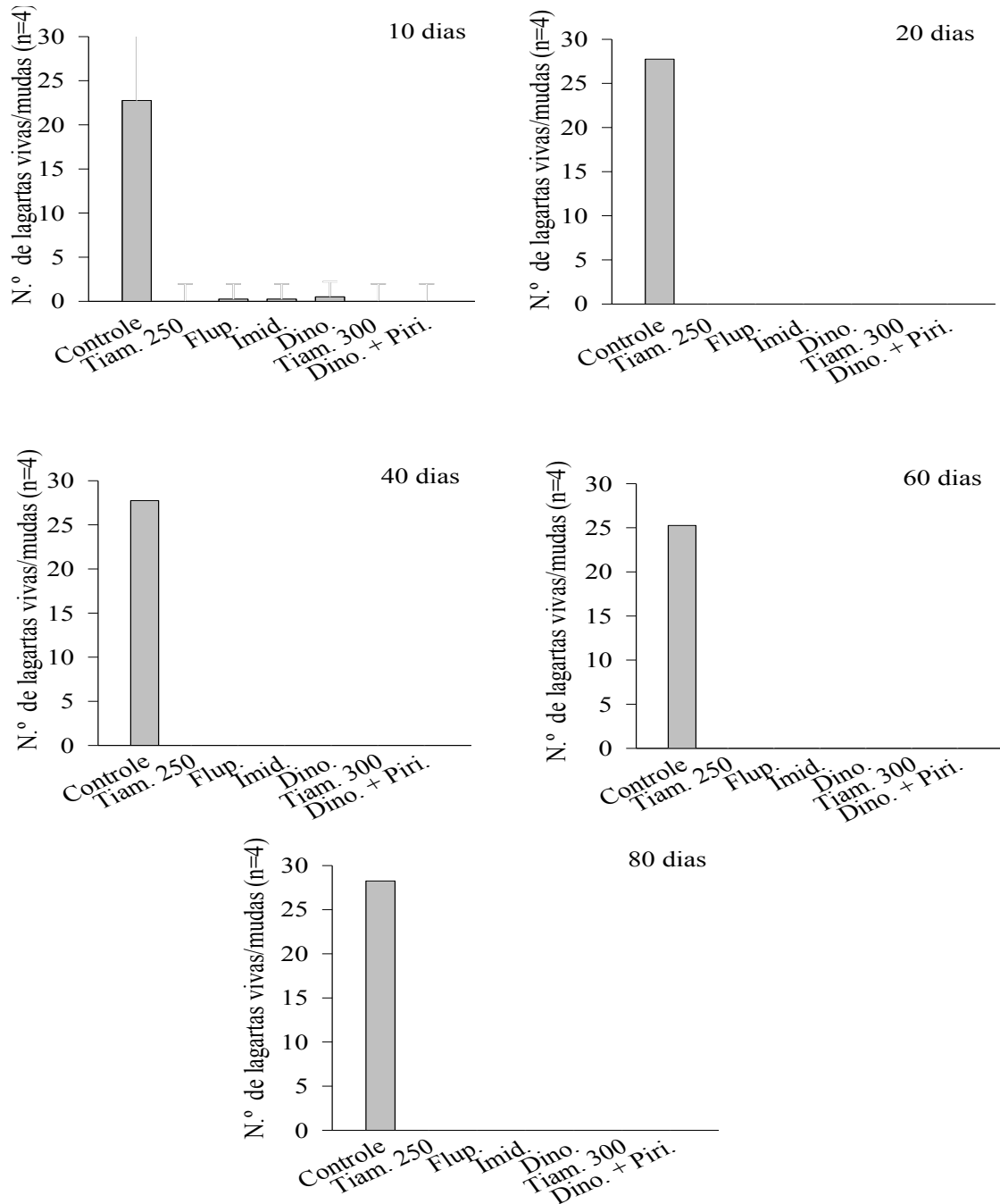
Fonte: O autor.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; \varnothing : Diâmetro da raiz principal; \varnothing Pon: diâmetro ponderado das raízes; N Fibra: número de fibras das raízes; Rend.: Rendimento de matéria seca das raízes; Tiam. 250: tiametoxam 250 g i.a ha^{-1} . Flup.: flupiradifurona. Imid.: imidacloprido; Dino.: dinotefuram; Tiam. 300: tiametoxam 300 g i.a ha^{-1} ; Dino. + Piri.: dinotefuram + piriproximifem; Controle: Água.

3.4 Infestação por bicho-mineiro

Não ocorreram infestações de bicho-mineiro nas mudas tratadas com inseticidas em todos os bioensaios realizados. As mudas controle, tratadas com água, foram as únicas infestadas em todos os ensaios avaliados. No bioensaio com 10 dias após a aplicação, ocorreu apenas uma lagarta de bicho-mineiro. Ademais, as mudas permaneceram protegidas da infestação em todos os ensaios, incluindo os bioensaios com 80 dias após a aplicação dos inseticidas (Figura 1).

Figura 1. Número de lagartas vivas de *L. coffeella* em mudas de café após 10, 20, 40, 60 e 80 dias tratadas com inseticidas via solo. (Tiam. 250: tiametoxam 250 g i.a ha⁻¹. Flup.: flupiradifurona. Imid.: imidacloprido; Dino.: dinotefuram; Tiam. 300: tiametoxam 300 g i.a ha⁻¹; Dino. + Piri.: dinotefuram + piriproxifem. Controle=Água



Fonte: O autor.

4 Discussão

O amplo uso e a predominância de inseticidas na agricultura, juntamente com o aumento contínuo da utilização preventiva dessas moléculas para o manejo de populações infestantes, têm sido objeto de debates e preocupações crescentes (Godói et al., 2023; Tudi et al., 2021; Sánchez-Bayo; Tennekes, 2020). Além disso, a suposta bioativação induzida pela aplicação de certos inseticidas, como neonicotinoides, tem contribuído para o uso excessivo destes compostos, adicionando mais uma camada de preocupação sobre esses inseticidas (Leite et al., 2022; Dhungana et al., 2020). Essas alegações do efeito bioativador estão associadas a diversas culturas, incluindo o cafeeiro (Leite et al., 2022). Diante dessas preocupações foi decidido testar a hipótese de que alguns inseticidas possuísem atividade bioativadoras no cafeeiro. Para isso, foram testados inseticidas à base de neonicotinoides, como o dinotefuram, o imidacloprido e dois compostos por tiametoxam. Também foram investigados inseticidas contendo butenolida, a flupiradifurona, e um outro composto por uma mistura de um neonicotinoide, o dinotefuram, e uma piridina, o piriproxifem.

As aplicações dos inseticidas não apresentaram efeitos significativos, positivos ou negativos, sobre a taxa de assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}^{-1}$), a condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^{-1}$), a taxa de transpiração ($\text{m, mol H}_2\text{O m}^2/\text{s}^{-1}$) e a taxa de transporte de elétrons ($\mu\text{mol (elétrons) m}^2/\text{s}^{-1}$) das mudas de cafeeiro nos bioensaios de 10, 20 e 40 dias após a aplicação dos inseticidas. Portanto, nas condições avaliadas, os inseticidas não exerceram efeitos bioativadores nem estressores sobre o metabolismo primário das mudas nas condições avaliadas. Embora diversos fatores, como a adubação, o estresse hídrico e a aplicação de inseticidas de diferentes grupos químicos possam influenciar as trocas gasosas e a fotossíntese das plantas (Souza et al., 2020; Todorenko et al., 2021; Mu et al., 2022). Não foram observadas diferenças significativas entre a aplicação dos inseticidas e grupo controle nos ensaios com 10, 20 e 40 dias nesse estudo.

Os resultados obtidos revelaram efeitos significativos sobre a morfologia das mudas de cafeeiro, tanto da parte aérea quanto na radicular. Avaliando a parte aérea e radicular, é possível observar que os inseticidas não apresentaram efeitos adversos sobre as mudas nos bioensaios realizados aos 10, 20 e 40 dias. No entanto, o inseticida o imidacloprido demonstrou, principalmente, efeitos negativos sobre a altura das plantas e a área foliar no

bioensaio 60 dias após a aplicação. Já no bioensaio de 80 dias após a aplicação, além de efeitos negativos sobre a altura e a área foliar das mudas, o inseticida contendo imidacloprido também resultou em redução da massa seca do caule das mudas. Leite et al. (2022) examinaram o impacto de inseticidas a base de tiametoxam sobre a fisiologia e a morfologia de plantas de cafeeiro, relatando efeitos negativos do inseticida sobre o crescimento a partir de 50 g i.a ha⁻¹ de tiametoxam. No entanto, nos resultados desta pesquisa, o inseticida tiametoxam 250 (250 g i.a ha⁻¹) provocou aumento na área (cm²) e no volume (cm³) do sistema radicular das mudas, ao passo que não provocou efeitos negativos na parte aérea das mudas. Em comparação com as mudas do grupo controle, aquelas que receberam o inseticida apresentaram mais que o dobro da área e volume nos bioensaios com 80 dias após a aplicação.

A dualidade na manifestação de efeitos benéficos ou prejudiciais dos pesticidas nas plantas pode inicialmente parecer contraditória, mas é importante compreendê-la como uma resposta bifásica à concentração, alinhada com o fenômeno conhecido como hormese (Erofeeva, 2022; Agathokleous; Calabrese, 2022). Em resumo, a hormese é uma resposta mediada a um estímulo, na qual doses baixas de um estressor provocam um efeito estimulante, enquanto doses altas resultam em inibição. Esse efeito positivo ou detectável gera uma resposta positiva observável, seguida por uma resposta negativa após atingir o limite de efeito positivo observado (Amorim et al., 2023; Erofeeva, 2022; Belz; Duke, 2022; Godínez-Mendoza et al., 2023). Embora os herbicidas tenham recebido mais atenção nos estudos sobre hormese em plantas, a manifestação desse fenômeno em plantas expostas a inseticidas, especialmente neonicotinoides, já foi relatada como causadora da bioativação em alguns cenários, inclusive para o cafeeiro (Godói et al., 2023; Erofeeva, 2022; Belz; Duke, 2022; Leite et al., 2022).

Na presente pesquisa não foram avaliadas concentrações dos inseticidas e sim apenas aquela recomenda, então a hipótese de ocorrência de fenômenos como a hormese aparenta ser um pouco inconsistente. Porém, ao analisar as diferenças nos resultados para ambos os inseticidas neonicotinoides tiametoxam 300 e tiametoxam 250, a hormese pode ser considerada com uma provável causa do efeito bioativador da área e volume do sistema radicular provocado pelo tiametoxam 250. De fato, o efeito bioativador do tiametoxam é frequentemente relatado em diversas culturas como bioativação no acúmulo de matéria e maturação da cana-de-açúcar, resistência ao estresse salino em sementes do meloeiro, maior desenvolvimento de plântulas de cenoura, aumento no desempenho fisiológico de sementes de tomate e cebola e na bioativação do crescimento e desenvolvimento do arroz (Annamalai et al., 2018; Guirra et al., 2022; Ludwig et al., 2023; Silva et al., 2023; Tunes et al., 2018). Os

resultados obtidos nesta pesquisa indicam efeito bioativador do tiametoxam 250 sobre a área e o volume das raízes, porém, sem efeito sobre as variáveis morfológicas da parte aérea das mudas após 10 e aos 80 dias da aplicação do inseticida.

Os inseticidas foram eficazes na proteção das mudas, mesmo nos bioensaios realizados com apenas 10 dias após a aplicação, quanto nos bioensaios com 80 dias após a aplicação. Os inseticidas neonicotinoides à base de tiametoxam, imidracloprido e dinotefuram, utilizados neste estudo são neurotóxicos com ação agonista nos receptores nicotínicos de acetilcolina (nAChRs). No entanto, não são degradados pela acetilcolinesterase (AChE), resultando na superestimulação da sinapse colinérgica e, conseqüentemente, na morte do inseto (Simon-Delso et al., 2015; Thany, 2023; Taillebois; Thany, 2022). Já o inseticida flupiradifurona, que é um inseticida butenolídeo, inspirado no grupo principal da lactona da estemofolina, e possui padrão farmacóforo e características estruturais de agonistas parcial de acetilcolina (nAChRs) (Haas et al., 2021; Jeschke et al., 2015). Outro inseticida avaliado é uma mistura de um neonicotinoide, o dinotefuram, e um éter piridiloxipropílico, o piriproxifem, que atua como regulador de crescimento de insetos de amplo espectro, mimetizando o funcionamento do hormônio juvenil e interferindo no desenvolvimento larval e metamorfose em adultos por meio da perturbação do sistema hormonal dos insetos (Devillers, 2020; Selim; Ibrahim; Taha, 2024).

Os inseticidas sistêmicos, uma vez absorvidos pelas raízes, são prontamente translocados pelo corpo da planta (Guedes et al., 2023). Os resultados indicam que a absorção e ação dos inseticidas utilizados ocorre de forma rápida, visto que as mudas não sustentaram a infestação do bicho-mineiro já no bioensaio de 10 dias após a aplicação dos inseticidas. Além disso, os resultados indicam que os inseticidas podem proporcionar proteção às plantas por um tempo longo, pois não ocorreram infestações nos bioensaios com 80 dias após a aplicação dos inseticidas. Esses resultados corroboram com relatos na literatura, especialmente sobre os neonicotinoides, que são conhecidos por sua alta eficácia no controle de pragas e podem manter as plantas de cafeeiros protegidas contra a infestação pelo bicho-mineiro por até 150 dias (Leite et al., 2022).

5 Conclusões

Inseticidas à base de tiametoxam (neonicotinoide), dinotefuram (neonicotinoide), dinotefuram + piriproxifem (neonicotinoide + éter piridiloxipropílico), imidacloprido (neonicotinoide), flupiradifurona (butenolida) não provocam estresse e bioativação sobre a fisiologia da fotossíntese e nem trocas gasosas em mudas de cafeeiro (*C. arabica* L.) cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 quando aplicados via solo para controle de bicho-mineiro-do-cafeeiro (*L. coffeella*).

O inseticida a base de imidacloprido provoca declínio na altura e na área foliar de folhas das mudas de cafeeiro aos 60 e 80 dias após sua aplicação. Também, o inseticida a base de imidacloprido provoca declínio no acúmulo de massa seca do caule de café 80 dias após sua aplicação via solo.

O inseticida à base de tiametoxam (250 g i.a ha⁻¹) provocou um aumento significativo na área e no volume ocupado pelas raízes das mudas de cafeeiro aos 80 dias após aplicação.

Portanto, ficou evidenciado que os inseticidas à base de tiametoxam (neonicotinoide), dinotefuram (neonicotinoide), dinotefuram + piriproxifem (neonicotinoide + éter piridiloxipropílico), imidacloprido (neonicotinoide) e flupiradifurona (butenolida) são eficazes na proteção de mudas de cafeeiro contra a infestação por bicho-mineiro durante um período que se estende dos 10 aos 80 dias após a aplicação.

Referências

- AFIFI, M.; LEE, E.; LUKENS, L.; SWANTON, C. Thiamethoxam as a seed treatment alters the physiological response of maize (*Zea mays*) seedlings to neighbouring weeds. **Pest management science**, v. 71, p. 505-514, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.3789>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.3789>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- AGATHOKLEOUS, E.; CALABRESE, E. J. Hormesis: a general biological principle. **Chemical Research in Toxicology**, v. 35, p. 547-549, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.2c00032>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.chemrestox.2c00032>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- AMORIM, D. J.; VIEIRA, A. M. C.; FIDELIS, C. R.; DOS SANTOS, J. C. C.; SILVA, M. A.; DEMÉTRIO, C. G. B. Modeling hormesis using multivariate nonlinear regression in plant biology: A comprehensive approach to understanding dose-response relationships. **Science of The Total Environment**, v. 905, p. 167041, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167041>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723056668?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- ANNAMALAI, M.; VASANTHA-SRINIVASAN, P.; THANIGAIVEL, A.; MUTHIAH, C.; KARTHI, S.; JENA, M.; PANDI, G.G.P.; ADAK, T.; MURUGESAN, A.G.; SENTHIL-NATHAN, S. Effect of thiamethoxam on growth, biomass of rice varieties and its specialized herbivore, *Scirpophaga incertulas* Walker. **Physiological and molecular plant pathology**, v. 101, p. 146-155, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.10.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0885576517301212>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- AGROFIT. **Sistema De Agrotóxicos Fitossanitários**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2024. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons Acesso em: 23, fevereiro de 2023.
- BELZ, R. G.; DUKE, S. O. Modelling biphasic hormetic dose responses to predict sub-NOAEL effects using plant biology as an example. **Current Opinion in Toxicology**, v. 29, p. 36-42, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.01.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468202022000031>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- DEVILLERS, J. Fate of pyriproxyfen in soils and plants. **Toxics**, v. 8, p. 20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics8010020>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2305-6304/8/1/20>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- DHUNGANA, S. K.; ADHIKARI, B.; ADHIKARI, A.; KIM, I.D.; KIM, J. H.; SHIN, D. H. Comparative effect of different insecticides on the growth and yield of soybeans. **Soil & Water Research**, v. 56, p. 206–213, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17221/77/2019-PPS>. Disponível em: <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/pps/2020/03/07.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2024.

EMBRAPA. **SAFIRA** - Software para análise de fibras e raízes por imagem. EMBRAPA cnpdia, 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/9702/safira---software-para-analise-de-fibras-e-raizes-por-imagem>. Acesso em: 20 jan. 24.

EROFEEVA, E. A. Hormesis in plants: its common occurrence across stresses. **Current Opinion in Toxicology**, v. 30, p.100333, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468202022000110>. Acesso em: 20 jan. 2024.

FORD, K. A.; CASIDA, J. E.; CHANDRAN, D.; GULEVICH, A. G.; OKRENT, R. A.; DURKIN, K. A.; SARPONG, R.; BUNNELLE, E. M.; WILDERMUTH, M. C. 2010. Neonicotinoid insecticides induce salicylate-associated plant defense responses. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, p. 17527-17532, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1013020107>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1013020107>. Acesso em: 20 jan. 2024.

GODÍNEZ-MENDOZA, P. L.; RICO-CHÁVEZ, A. K.; FERRUSQUÍA-JIMENEZ, N. I.; CARBAJAL-VALENZUELA, I. A.; VILLAGÓMEZ-ARANDA, A. L.; TORRES-PACHECO, I.; GUEVARA-GONZÁLEZ, R. G. Plant hormesis: revising of the concepts of biostimulation, elicitation and their application in a sustainable agricultural production. **Science of the Total Environment**, v. 894, p.164883, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164883>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723035064>. Acesso em: 20 jan. 2024.

GODÓI, C. T. D.; CAMPOS, S. O.; MONTEIRO, S. H.; RONCHI, C. P.; SILVA, A. A.; GUEDES, R. N. C. Thiamethoxam in soybean seed treatment: Plant bioactivation and hormesis, besides whitefly control?. **Science of The Total Environment**, v. 857, p. 159443, 2023. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159443>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722065421>. Acesso em: 20 jan. 2024.

GUEDES, N. M. P.; GUEDES, R. N. C.; PICANÇO, M. C. Effects of carbosulfam on pineapple. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, p. 283-286, 1996. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Picano/publication/279503082_Efeitos_do_carbosulfam_no_crescimento_do_abacaxizeiro_Ananas_comosus_L_Merr/links/55d139ab08ae6a881385eb81/Efeitos-do-carbosulfam-no-crescimento-do-abacaxizeiro-Ananas-comosus-L-Merr.pdf. Acesso em: 20 jan. 2024.

GUEDES, R. N. C.; BIONDI, A.; AGATHOKLEOUS, E.; NUNES-NESI, A. (Systemic) Insecticides in Plants: Phytotoxicity, Bioactivation, or Hormesis?. **Agriculture Communications**, v. 1, p. 100002, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrcom.2023.100002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949798123000029>. Acesso em: 20 jan. 2024.

GUIRRA, K. S.; TORRES, S. B.; DE FRANÇA CARDOZO, L. V.; DA SILVA, J. E. S. B.; NETO, F. A. N.; GUIRRA, B. S.; DA LUZ BRITO, W. A. Pre-germination treatment of

carrot seeds with bioactivator. **Revista De Agricultura Neotropical**, v. 9, p. e6877-e6877, 2022. Doi: <https://doi.org/10.32404/rean.v9i2.6877>. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/6877>. Acesso em: 20 jan. 2024.

HAAS, J.; ZAWORRA, M.; GLAUBITZ, J.; HERTLEIN, G.; KOHLER, M.; LAGOJDA, A.; LUEKE, B.; MAUS, C.; ALMANZA, M-T.; EMYR DAVIES T.G.; BASS, C.; NAUEN, R. A toxicogenomics approach reveals characteristics supporting the honey bee (*Apis mellifera* L.) safety profile of the butenolide insecticide flupyradifurone. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 217, p. 112247, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112247>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651321003584>. Acesso em: 20 jan. 2024.

HOUSE, M. A.; SWANTON, C. J.; LUKENS, L. N. The neonicotinoid insecticide thiamethoxam enhances expression of stress-response genes in *Zea mays* in an environmentally specific pattern. **Genome**, v. 64, p. 567-579, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1139/gen-2020-0110>. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/gen-2020-0110>. Acesso em: 20 jan. 2024.

JESCHKE, P.; HAAS, M.; NAUEN, R.; GUTBROD, O.; BECK, M. E.; MATTHIESEN, S.; VELTEN, R.. Sivanto®-A novel insecticide with a sustainable profile. **American Chemical Society**, v. 24, p. 331-344, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/bk-2015-1204.ch024>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bk-2015-1204.ch024>. Acesso em: 20 jan. 2024.

KHURSHID, A.; INAYAT, R.; BASIT, A.; MOBARAK, S.H.; GUI, S.H.; LIU, T. X. Effects of Thiamethoxam on Physiological and Molecular Responses to Potato Plant (*Solanum tuberosum*), Green Peach Aphid (*Myzus persicae*) and Parasitoid (*Aphidius gifuensis*). **Pest Management Science**, v. 1, p. 1-10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.8006>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.8006>. Acesso em: 20 jan. 2024.

KLINGELHÖFER, D.; BRAUN, M.; BRÜGGMANN, D.; GRONEBERG, D.A. Neonicotinoids: A critical assessment of the global research landscape of the most extensively used insecticide. **Environmental Research**, v. 213, p. 113727, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113727>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935122010544>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LANKA, S. K.; SENTHIL-NATHAN, S.; BLOUIN, D. J.; STOUT, M. J. Impact of thiamethoxam seed treatment on growth and yield of rice, *Oryza sativa*. **Journal of economic entomology**, v. 110, p. 479-48, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/tox043>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jee/article-abstract/110/2/479/3053355?login=false>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LARSEN, R. J.; FALK, D. E. Effects of a seed treatment with a neonicotinoid insecticide on germination and freezing tolerance of spring wheat seedlings. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 93, p. 535-540. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps2012-127>. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.4141/cjps2012-127>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LEITE, S.A.; SANTOS, M. P.; RESENDE-SILVA, G. A.; COSTA, D. R.; MOREIRA, A. A.; LEMOS, O. L.; GUEDES, R. N. C.; CASTELLANI, M. A. Area-wide survey of chlorantraniliprole resistance and control failure likelihood of the Neotropical coffee leaf miner *Leucoptera coffeella*. **Journal of Economic Entomology**, v. 113, p. 1399–1410, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/toaa017>. Disponível em:

<https://academic.oup.com/jee/article/113/3/1399/5762572?login=false>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LEITE, S. A.; GUEDES, R. N. C.; SANTOS, M. P. D.; COSTA, D. R. D.; MOREIRA, A. A.; MATSUMOTO, S. N.; LEMOS, O. L.; CASTELLANI, M. A. Profile of coffee crops and management of the Neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella*. **Sustainability**, v. 12, p. 8011, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12198011>. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/19/8011>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LEITE, S. A.; DOS SANTOS, M. P.; DA COSTA, D. R.; MOREIRA, A. A.; GUEDES, R. N. C.; CASTELLANI, M. A. Time-concentration interplay in insecticide resistance among populations of the neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella*. **Journal of Economic Entomology**, v. 23, p. 232–241, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/afe.12425>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jee/article/113/3/1399/5762572?login=false>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LEITE, S. A.; GUEDES, R. N. C.; COSTA, D. R.; COLMENAREZ, Y. C.; MATSUMOTO, S. N.; SANTOS, M. P.; COELHO, B. S.; MOREIRA, A. A.; CASTELLANI, M. A. The effects of thiamethoxam on coffee seedling morphophysiology and Neotropical leaf miner (*Leucoptera coffeella*) infestations. **Pest Management Science**, v. 78, p. 2581–2587, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.6889>. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.6889>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LI, X.; ZHANG, M.; LI, Y.; YU, X.; NIE, J. Effect of neonicotinoid dinotefuran on root exudates of *Brassica rapa* var. chinensis. **Chemosphere**, v. 266, p. 129020, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129020>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520332173>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LUDWIG, E. J.; DA SILVA, J. R.; DE BASTIANI, G. G.; STEFANELLO, R.; NUNES, U. R.; Heldwein, A. B. Physiological responses in canola seeds and seedlings treated with thiametoxam and submitted to saline stress. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, p. e10093, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n3e10093>. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/10093>. Acesso em: 20 jan. 2024.

MOTTA, I. O.; DANTAS, J.; VIDAL, L.; BILIO, J.; PUJOL-LUZ, J. R.; ALBUQUERQUE, É. V. 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, p. e20200122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9665-RBENT-2020-0122>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbent/a/JFpxCJrGbscNhcCNx7xS9T3M/>. Acesso em: 20 jan. 2024.

MU, Q. E.; ZHANG, M.; LI, Y.; FENG, F.; YU, X.; NIE, J. 2022. Metabolomic Analysis Reveals the Effect of Insecticide Chlorpyrifos on Rice Plant Metabolism. **Metabolites**, v. 12,

p. 1289. DOI: <https://doi.org/10.3390/metabo12121289>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2218-1989/12/12/1289>. Acesso em: 20 jan. 2024.

R Core Team. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 04 nov. 2023.

RAMIRO, D. A.; GUERREIRO-FILHO, O.; QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; MATTHIESEN, S.C. Caracterização anatômica de folhas de cafeeiros resistentes e suscetíveis ao bicho-mineiro. **Bragantia**, v. 63, p. 363–372, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052004000300006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/s4wT9GQbbPWPnhRZMDGvbqf/>. Acesso em: 20 jan. 2024.

RONDEAU, S.; RAINE, N. E. Single and combined exposure to ‘bee safe’ pesticides alter behaviour and offspring production in a ground-nesting solitary bee (*Xenoglossa pruinosa*). *Proc. R. Soc. B.* v. 291, p. 20232939, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2023.2939>. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rspb.2023.2939>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SALGADO, V. L. Studies on the mode of action of spinosad: insect symptoms and physiological correlates. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 60, p. 91-102, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1006/pest.1998.2332>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004835759892332X>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SÁNCHEZ-BAYO, F.; TENNEKES, H. A. Time-cumulative toxicity of neonicotinoids: experimental evidence and implications for environmental risk assessments. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, p. 1629, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17051629>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/5/1629>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SCHMILDT, E. R.; AMARAL, J. A. T. D.; SCHMILDT, O.; SANTOS, J. S. Análise comparativa de equações para estimativa da área foliar em cafeeiros. *Coffee Sci.* v. 9, p. 155-167, 2014. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/8025>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SELIM, N. M. M.; IBRAHIM, H. M.; TAHA, H. S. E.-D. Chemical Stability Effect of Pyriproxyfen and Bifenthrin Insecticides and Their Toxicology Changes. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 67, p. 269-279, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2023.216069.8117>. Disponível em: https://ejchem.journals.ekb.eg/article_312101.html. Acesso em: 20 jan. 2024.

SHAHID, M.; SINGH, U. B.; KHAN, M. S. Metabolomics-based mechanistic insights into revealing the adverse effects of pesticides on plants: an interactive review. **Metabolites**, v. 13, p. 246. DOI: <https://doi.org/10.3390/metabo13020246>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2218-1989/13/2/246>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SHI, W.; ZHANG, Q.; SHENG, Y.; DONG, Z.; FENG, T.; ZHANG, J.; YU L.; XU, Z.; PANG L.; CHEN, J.; CHEN, X.; HUANG, J. Neonicotinoid insecticide imidacloprid induces chemosensory deficits in a nontarget parasitoid wasp. **Science of The Total**

Environment, v. 907, p. 168089, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168089>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723067165>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SHI, F.; LU, Y.; SUN, D.; AN, Y. Imidacloprid triggers transcriptomic changes in sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Tropical Plant Biologyn**, 14, 203-212, 2021. DOI : <https://doi.org/10.1007/s12042-021-09284-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12042-021-09284-5>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SILVA, D. P.; OLIVEIRA, M. P.; OLIVEIRA, J. A. V.; JACOMASSI, L. M.; MOMESSO, L.; GARCIA, A.; SIQUEIRA, G. F.; FOLTRAN, R.; SORATTO, R. P.; DINARDO-MIRANDA, L. L.; CRUSCIOL, C. A. C. Phytotonic effects of thiamethoxam on sugarcane managed with glyphosate as a ripener. **Pest Management Science**, v. 78, p. 4006-4017, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.7019>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.7019>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SILVA, D. P.; JACOMASSI, L. M.; OLIVEIRA, J. A. V.; OLIVEIRA, M. P.; MOMESSO, L.; SIQUEIRA, G. F.; FOLTRAN, R.; SORATTO, R. P.; DINARDO-MIRANDA L. L.; CRUSCIOL, A. C. Growth-Promoting Effects of Thiamethoxam on Sugarcane Ripened With Sulfometuron-Methyl. **Sugar Tech**, v. 25, p. 339-351, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01190-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12355-022-01190-8>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SIMON-DELISO, N.; AMARAL-ROGERS, V.; BELZUNCES, L. P.; BONMATIN, J. M.; CHAGNON, M.; DOWNS, C.; FURLAN, L.; GIBBONS, D.W.; GIORIO, C.; GIROLAMI, V.; GOULSON, D.; KREUTZWEISER, D. P.; KRUPKE C. H.; LIESS, M.; LONG, E.; MCFIELD, M.; MINEAU, P.; MITCHELL, E. A. D.; MORRISSEY, C. A.; NOOME, D. A.; PISA, L.; SETTELE, J.; STARK, J. D.; TAPPARO, A.; VAN DYCK, H.; VAN PRAAGH, J.; VAN DER SLUIJS, J. P.; WHITEHORN, P. R.; WIEMERS, M. Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites. **Tendances, usages et modes d'action des métabolites**, v. 22, p. 5-34, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3470-y>. Disponível em: <https://hal.science/hal-01171969/>. Acesso em: 20 jan. 2024.

STAMM, M. D.; ENDERS, L. S.; DONZE-REINER, T. J.; BAXENDALE, F. P.; SIEGFRIED, B. D.; HENG-MOSS, T. M. Transcriptional response of soybean to thiamethoxam seed treatment in the presence and absence of drought stress. **BMC genomics**, v. 15, p. 1-13, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-1055>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2164-15-1055>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SOUZA, B. P.; MARTINEZ, H. E. P.; De CARVALHO, F. P.; LOUREIRO, M. E.; STURIAO, W. P. Gas exchanges and chlorophyll fluorescence of young coffee plants submitted to water and nitrogen stresses. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, p. 2455-2465, 2020. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1771589>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01904167.2020.1771589>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TAILLEBOIS, E.; THANY, S. H. The use of insecticide mixtures containing neonicotinoids as a strategy to limit insect pests: Efficiency and mode of action. **Pesticide Biochemistry and**

Physiology, v. 184, p. 105126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105126>.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048357522000931>.
Acesso em: 20 jan. 2024

THANY, S. H. Molecular Mechanism of Action of Neonicotinoid Insecticides. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, p. 5484, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24065484>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/6/5484>. Acesso em: 20 jan. 2024.

THOMPSON, D. A.; LEHMLER, H. J.; KOLPIN, D. W.; HLADIK, M. L.; VARGO, J. D.; SCHILLING, K. E.; LEFEVRE, G. H.; PEEPLES, T. L.; POCH, M. C.; LADUCA, L. E.; CWIERTNY, D. M.; FIELD, R. W. A critical review on the potential impacts of neonicotinoid insecticide use: current knowledge of environmental fate, toxicity, and implications for human health. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 22, p. 1315-1346, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9EM00586B>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/em/c9em00586b/unauth>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TODORENKO, D. A.; HAO, J.; SLATINSKAYA, O. V.; ALLAKHVERDIEV, E. S.; KHABATOVA, V. V.; IVANOV, A. D.; RADENOVIC, C. N.; MATORIN, D. N.; ALWASEL, S.; MAKSIMOV, G. V.; ALLAKHVERDIEV, S. I. Effect of thiamethoxam on photosynthetic pigments and primary photosynthetic reactions in two maize genotypes (*Zea mays*). **Functional Plant Biology**, v. 48, p. 994-1004, 2021. <https://doi.org/10.1071/FP21134>. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/FP/FP21134>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TUDI, M.; DANIEL RUAN, H.; WANG, L.; LYU, J.; SADLER, R.; CONNELL, D.; CHU, C.; PHUNG, D.T. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. **International journal of environmental research and public health**, v. 18, p. 1112, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/3/1112>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TUNES, L. M.; Da SILVA ALMEIDA, A.; MENEGHELLO, G. E.; VILLELA, F. A.; SOARES, V. N.; BORTOLOTTI, M. Bioactivator on physiological performance of tomato and onion seeds. **Comunicata Scientiae**, v. 9, p. 19-25, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/cs.v9i1.1425>. Disponível em: <https://comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/1425>. Acesso em: 20 jan. 2024.

WALERIUS, A. H.; PALLINI, A.; VENZON, M.; SANTANA JÚNIOR, P. A.; COSTA, T. L.; PAES, J. D. S.; PIMENTEL, E. DE S.; PICANÇO, M. C. Use of Geostatistics as a Tool to Study Spatial-Temporal Dynamics of *Leucoptera coffeella* in Coffee Crops. **Agriculture**, v. 13, p. 438, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020438>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/2/438>. Acesso em: 20 jan. 2024.

WULFF, J. A.; KIANI, M.; REGAN, K.; EUBANKS, M. D.; SZCZEPANIEC, A. Neonicotinoid insecticides alter the transcriptome of soybean and decrease plant resistance. **International journal of molecular sciences**, v. 20, p. 783, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20030783>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/3/783>. Acesso em: 20 jan. 2024.

XU, L.; XU, X.; GUO, L.; WANG, Z.; WU, X.; KUANG, H.; XU, C. Potential environmental health risk analysis of neonicotinoids and a synergist. **Environmental Science & Technology**, v. 55, p. 7541-7550, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00872>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.1c00872>. Acesso em: 20 jan. 2024.

XU, X.; WANG, X.; YANG, Y.; ARES, I.; MARTINEZ, M.; LOPEZ-TORRES, B.; MARTÍNEZ-LARRAÑAGA, M. R.; WANG, X.; ANADON, A.; MARTINEZ, M. A. Neonicotinoids: mechanisms of systemic toxicity based on oxidative stress-mitochondrial damage. **Archives of Toxicology**, v. 96, p. 1493-1520, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-022-03267-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00204-022-03267-5>. Acesso em: 20 jan. 2024.

ZHOU, G. C.; WANG, Y. W. Y.; MA YUAN, M. Y.; ZHAI SHAN, Z. S.; ZHOU LINGYAN, Z. L.; DAI YIJUN, D. Y.; YUAN SHENG, Y. S. The metabolism of neonicotinoid insecticide thiamethoxam by soil enrichment cultures, and the bacterial diversity and plant growth-promoting properties of the cultured isolates. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 49, p. 381-390, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/03601234.2014.894761>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03601234.2014.894761>. Acesso em: 20 jan. 2024.

ZUIM, V.; MARQUES, V. M.; GODOI, C. T. D.; GONTIJO, L. M.; HARO, M. M.; GUEDES, R. N. C. Does refuge spillover affect arthropod food webs associated with Bt maize?. **Pest Management Science**, v. 77, p. 3088-3098, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.6388>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.6388>. Acesso em: 20 jan. 2024.

Capítulo 2

Inseticidas via solo utilizado no controle do Bicho-mineiro-do-cafeeiro e metaboloma de *Coffea arabica* L.

RESUMO

Em meio a controvérsia sobre as vantagens e desvantagens do uso de inseticidas, há um crescente interesse no potencial efeito desses compostos na própria planta hospedeira. Assim, uma caracterização à nível molecular, por meio da análise das alterações da abundância de compostos do metabolismo das plantas em resposta a aplicação de agroquímicos é necessária para desenvolver uma compreensão dos seus efeitos biológicos. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o metaboloma de mudas de cafeeiro tratadas com diferentes inseticidas utilizados no manejo do bicho-mineiro. Para tanto, mudas de café foram tratadas com inseticidas à base de tiametoxam, dinotefuram, dinotefuram + piriproxifem, imidacloprido e flupiradifurona via solo. O tratamento controle foi composto de mudas tratadas com água. Oitenta dias após a aplicação, folhas do terceiro par foram coletadas em cada muda e encaminhadas para as análises. As análises foram conduzidas em um cromatógrafo gasoso acoplado a um espectrômetro de massas (GCMS-QP2010, Shimadzu, Kyoto, Japão). A aplicação dos inseticidas tiametoxam, imidacloprido, flupiradifurona, dinotefuram e dinotefuram + piriproxifem aumentou a expressão de açúcares livres e alguns ácidos. Os inseticidas tiametoxam 300 g i.a ha⁻¹, tiametoxam 250 g i.a ha⁻¹ e imidacloprido alteram algumas rotas metabólicas. Porém, a via da galactose foi fortemente afetada por esses inseticidas. O inseticida Tiametoxam 300 g i.a ha⁻¹ provocou redução da expressão de cafeína pela muda. As plantas são capazes de ajustar seus níveis de açúcares de acordo estímulos ambientais, muitos desses açúcares estão relacionados a resistência a estresses ambientais. A galactose é um açúcar componente de moléculas essenciais na parede celular, no cafeeiro tem grande influência sobre a qualidade de bebida do café, sendo mais estudada nesse aspecto. Os inseticidas aumentam a expressão de açúcares livres. Os inseticidas neonicotinoides à base de tiametoxam e imidacloprido provocam alterações na via metabólica da galactose.

Palavras-chave: *Leucoptera coffeella*; controle químico; bioativador; metabolômica; café arábica.

Chapter 2

Soil insecticides used to control coffee leaf miner and metabolome of *Coffea arabica* L.

Abstract

Amidst the controversy over the advantages and disadvantages of using insecticides, there is a growing interest in the potential effect of these compounds on the host plant itself. Thus, a molecular-level characterization, through the analysis of changes in the abundance of plant metabolism compounds in response to the application of agrochemicals, is necessary to develop an understanding of their biological effects. Therefore, the aim of this study was to evaluate the metabolome of coffee seedlings treated with different insecticides used in the management of the coffee leaf miner. To this end, coffee seedlings were treated with soil-applied insecticides based on thiamethoxam, dinotefuran, dinotefuran + pyriproxyfen, imidacloprid, and flupyradifurone. The control treatment consisted of seedlings treated with water. Eighty days after application, the third pair of leaves was collected from each seedling and sent for analysis. The analyses were conducted using a gas chromatograph coupled to a mass spectrometer (GCMS-QP2010, Shimadzu, Kyoto, Japan). The application of the insecticides thiamethoxam, imidacloprid, flupyradifurone, dinotefuran, and dinotefuran + pyriproxyfen increased the expression of free sugars and some acids. The insecticides thiamethoxam 300 g a.i ha⁻¹, thiamethoxam 250 g a.i ha⁻¹, and imidacloprid altered some metabolic pathways. However, the galactose pathway was strongly affected by these insecticides. Thiamethoxam 300 g a.i ha⁻¹ caused a reduction in the expression of caffeine by the seedling. Plants are capable of adjusting their sugar levels according to environmental stimuli, and many of these sugars are related to resistance to environmental stresses. Galactose is a sugar component of essential molecules in the cell wall and has a significant influence on coffee beverage quality, being studied more extensively in this context. Insecticides increase the expression of free sugars. Neonicotinoid insecticides based on thiamethoxam and imidacloprid cause alterations in the galactose metabolic pathway.

Keywords: *Leucoptera coffeella*; chemical control; bioactivator; metabolomics; arabica coffee.

1 Introdução

Em meio a controvérsia contínuas sobre as vantagens e desvantagens do uso de inseticidas no manejo de pragas, há um crescente interesse no potencial efeito desses compostos na própria planta hospedeira (Leite et al., 2022). Isso se deve ao fato de que a exposição da planta aos inseticidas pode afetá-la diretamente, tanto de forma negativa quanto positiva (Godoi et al., 2023). A manifestação destas influências, positivas ou negativas, é frequentemente vista como uma resposta bifásica à concentração do inseticida, semelhante ao fenômeno compreendido como hormese (Agathokleous, 2018; Agathokleous e Calabrese, 2022). Essa influência geralmente está associada ao aumento ou diminuição das espécies reativas de oxigênio, denominadas ROS, resultando em alterações no equilíbrio de fitohormônios e na biossíntese de moléculas essenciais (Yengkokpam e Mazumder, 2020; Shahid et al., 2021). No cafeeiro, inseticidas largamente utilizadas no controle de Bicho-mineiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville e Perrottet) (Lepidoptera: Lyonetiidae), são alvo de pressuposições de efeito fitotônico sobre o desenvolvimento das plantas e, por isso, pode ocorrer o uso desnecessário destes compostos (Leite et al., 2022).

As plantas possuem a capacidade genética de produzir metabólitos secundários, cujo objetivo varia conforme os sinais ambientais e o conjunto genético das plantas, auxiliando-as na adaptação e sobrevivência (Wurtzel et al., 2016). Esses metabólitos são multifuncionais, atuando como reguladores, desintoxicantes, transportadores, acompanhantes, proteases, entre outros (Jazayeri et al., 2021). O aumento das espécies reativas de oxigênio pode resultar em uma série de efeitos negativos ou positivos. Relatos indicam efeitos adversos, como redução de germinação, absorção de nutrientes, vigor, crescimento, metabolismo de carboidratos e sobrevivência das plantas (Ford et al., 2011; Bragança et al., 2018; Zhang et al., 2022a; Yengkokpam e Mazumder, 2020; Shahid et al., 2021; Shakir et al., 2016). No entanto, também foram observados efeitos benéficos nas características das plantas, especialmente quando expostas a inseticidas neonicotinoides, sugerindo potencial como bioativadores de plantas (Leite et al., 2022; Macedo; Castro, 2011; Macedo et al., 2013; Dhungana et al., 2016). Entretanto, a maioria dos estudos sobre o fenômeno de bioativação pelos inseticidas à base de neonicotinoides não consideram toda a fenologia das plantas (Macedo e Castro, 2011; Macedo et al., 2013; Lanka et al., 2017; Annamalai et al., 2018), com exceção de trabalhos publicados recentemente na cultura da soja e do cafeeiro (Godoi et al., 2023; Leite et al., 2022).

Leite et al. (2022) conduziram extenso estudo com cinco concentrações do ingrediente ativo de tiametoxam (neonicotinoides) e observaram efeitos prejudiciais dos inseticidas no desenvolvimento de mudas. Os autores destacam que o uso destes inseticidas é amplamente incentivado pela sua alta eficácia contra o bicho-mineiro, juntamente com crença em suas supostas propriedades bioativadoras. No entanto, os autores alertam para os potenciais perigos do uso inadequado dos pesticidas. Embora os resultados sugiram que seja improvável que o tiametoxam produza qualquer bioativação metabólica em plantas de café, os autores não realizaram análises sobre o metaboloma das plantas tratadas com os inseticidas para avaliação de possíveis alterações que poderiam explicar a possível causa dos efeitos prejudiciais. Portanto, uma caracterização por meio de análises do metabolismo das respostas das plantas a esses agroquímicos é necessária para desenvolver uma compreensão dos seus efeitos biológicos, o que é fundamental para a concepção e aplicação sustentáveis desta tecnologia (Zhang et al., 2022a)

A metabolômica desempenha um papel crucial na identificação e quantificação simultânea de perfis metabólicos globais, representando uma ferramenta poderosa para investigar os efeitos dos xenobióticos em organismos biológicos (Hall, 2006). Essa abordagem fornece uma avaliação abrangente das perturbações ambientais complexas em sistemas biológicos, especialmente para contaminantes e poluentes emergentes (Matich et al., 2019). A metabolômica é um componente importante da ciência ômica pós-genômica, que se concentra na análise química abrangente de metabólitos, conhecido como metaboloma, em um sistema biológico específico, por exemplo, uma célula, um tecido ou um organismo em um local específico estágio de desenvolvimento ou sob uma circunstância induzida (Sun et al., 2020). Como resultado, a metabolômica tem sido aplicada para estudar diferentes aspectos relacionados ao café, incluindo a classificação de frutos de acordo com variedade e origem, no processamento dos frutos para melhorar a qualidade da bebida, a avaliação do metaboloma em resposta ao ataque de insetos pragas e a análise de compostos de resistência produzidos pelas plantas (Castro-Moretti et al., 2020; Green et al., 2015; Farag et al., 2022; Rocchetti et al., 2020; Wei et al., 2012). Embora alguns estudos tenham investigado as mudanças nos perfis de metabólitos celulares em culturas expostas a pesticidas, não há trabalhos disponíveis que avaliem o metaboloma das plantas de café após a aplicação de inseticidas (Pereira et al., 2014; Ge et al., 2019; Liu e Zhu, 2020).

O emprego de abordagens de análise de metabólitos pode fornecer uma compreensão mais aprofundada das respostas sistemáticas da cultura do cafeeiro frente a aplicação de inseticidas. Considerando a significativa importância econômica do cafeeiro para o Brasil e a

prática contínua de uso de inseticidas para o manejo de insetos pragas, este estudo tem como objetivo avaliar o metaboloma de mudas de cafeeiro Catuaí Vermelho IAC 144 tratadas com inseticidas a base de tiametoxam (neonicotinoide), dinotefuram (neonicotinoide), imidacloprido (neonicotinoide), dinotefuram + piriproxifem (neonicotinoide + éter piridiloxipropílico) e flupiradifurona (butenolida).

2 Material e Métodos

2.1 Condução das mudas e aplicação dos inseticidas

Para condução das análises do metaboloma, as mudas foram cultivadas em casa de vegetação localizada no campo experimental da Universidade Federal de Viçosa, campus Rio Paranaíba (UFV-CRP). Para isso, utilizaram-se 28 mudas da variedade de cafeeiro Catuaí Vermelho IAC 144, as quais foram transplantadas em vasos plásticos de 3,8 litros de capacidade, preenchidos com terra de barranco como substrato. As mudas foram acomodadas em sete gaiolas entomológicas (1,30 x 2,00 x 1,00 m).

As mudas permaneceram em aclimação e condicionamento nos vasos por 30 dias sem receber nenhum tratamento e após esse período, as mudas receberam cada tratamento, compostos de 6 inseticidas a base de base de tiametoxam (neonicotinoide), dinotefuram (neonicotinoide), dinotefuram + piriproxifem (neonicotinoide + éter piridiloxipropílico), imidacloprido (neonicotinoide), flupiradifurona (butenolida) e, por último, o tratamento controle foi composto de água. Assim, cada inseticida e o controle foram aplicados em quatro (4) mudas sendo cada uma repetição. As doses aplicadas seguiram recomendação cadastradas no Sistema Agrofit (2023) (Tabela 1). Para aplicação dos inseticidas, as mudas ficaram sem irrigação por 24 horas e após os inseticidas foram aplicados simulando o método de aplicação por Drench, aplicando os inseticidas sob a copa das mudas diretamente no solo, margeando a borda do vaso. Após a aplicação dos inseticidas, as mudas foram mantidas sem irrigação por 24 horas, sendo retomados tratos culturais após esse período.

Tabela 1- Grupo químico, ingrediente ativo, concentração, formulação dos inseticidas utilizados no bioensaio

| Grupo Químico | Ingrediente ativo | Concentração g i.a ha ⁻¹ * | Formulação | Volume de calda (ml) |
|---|-------------------------------|--|------------|-------------------------|
| Neonicotinoide | Tiametoxam | 250 | WG | 50 |
| Butenolida | Flupiradifurona | 300 | SL | 50 |
| Neonicotinoide | Dinotefuram | 175 | SC | 50 |
| Neonicotinoide | Tiametoxam | 300 | WG | 50 |
| Neonicotinoide | Imidaclopride | 140 | WG | 50 |
| Neonicotinoide + Éter Piridiloxipropílico | Dinotefuram + Piriproxifem | 150 + 37,5 | EW | 50 |

Fonte: O autor.

*Gramas de ingrediente ativo por hectare.

2.2 Coleta e preparo do material

Para realização das análises, uma folha do terceiro par de folhas de cada repetição foi coletada, totalizando assim quatro folhas por tratamento, que foram divididas em cinco sub amostras, totalizando 20 amostras por tratamento. As amostras foram armazenadas em nitrogênio líquido, seguida de maceração até obter um pó fino. A partir disso, amostras de 100 mg foram transferidas para microtubos de plástico e foram adicionados 2 mL de solução extratora composta de metanol (MeOH), clorofórmio (CHCl₃) e água ultrapura numa proporção de 3:1:1. O padrão interno Adonitol Purex foi adicionado à solução extratora em concentração de 50 µL.mL⁻¹. As amostras, juntamente com a solução extratora, foram submetidas a agitação em disruptor de células (L-Beader 6 Loccus®), operando a 3500 rpm em ciclos de 60 segundos de agitação intercalados com 30 segundos de repouso. Esse processo foi auxiliado por esferas de aço inoxidável de 2,8 mm de diâmetro. Após a agitação, 1 mL do sobrenadante foi transferido para novos microtubos e acrescentou-se 300 µL de Hexano (P.A.). Em seguida, as amostras foram mantidas em repouso por 3 minutos e 500 µL do meio foram retirados e colocados em microtubos para secagem em concentrador de amostras a 40 °C ao longo de 16 horas.

Após a secagem das amostras, as mesmas foram mantidas no congelador até o momento de derivatização, etapa que se segue pela adição de 50 µL de hidrocloreto de metoxiamina, previamente diluído em piridina (20 mg.mL⁻¹), a 37 °C. Após 2 horas de incubação, foram adicionados 50 µL de BSTFA (Bis(trimetilsilil) trifluoroacetamida). As amostras foram mantidas em repouso a 37 °C por 30 minutos para garantir a completa

derivatização, Em seguida, as alíquotas derivatizadas foram transferidas para frascos de 2 mL contendo inserções redutoras de volume de 200 μL , preparadas para análise por GC-MS.

2.3 Análise das amostras

A análise foi conduzida em um cromatógrafo gasoso acoplado a um espectrômetro de massas (GCMS-QP2010, Shimadzu, Kyoto, Japão), utilizando a coluna capilar DB-5MS (30 m \times 250 μm diâmetro interno). A temperatura de injeção de amostras foi mantida a 250 $^{\circ}\text{C}$, A separação cromatográfica iniciou-se a 80 $^{\circ}\text{C}$ por 2 minutos, seguida de um aumento de 5 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ até atingir 250 $^{\circ}\text{C}$, mantida por 8 minutos, com um fluxo constante de gás hélio de 1,0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ durante todo o processo. O volume de injeção foi de 1 μL com um split de 20:1. Foi realizada a varredura do espectro de massas no intervalo de 40 a 650 m/z em modo de scan completo com 5 scans por segundo. Foi aplicado um corte de solvente de 3 minutos, considerando o tempo de retenção da piridina utilizada na etapa de derivatização. As temperaturas de interface e da fonte de íons utilizadas foram de 280 $^{\circ}\text{C}$. A voltagem do detector foi de 1,2 kV e o modelo de impacto de elétrons (EI) foi selecionado para ionização dos metabólitos em 70 eV. Um padrão de alcanos (C9-C30) foi utilizado para controle de qualidade e cálculo dos índices de retenção, A identificação dos compostos foi realizada com base na biblioteca NIST Mass Spectral Library 2017, aceitando compostos identificados com até 85% de similaridade e valores de m/z correspondentes.

2.4 Processamento de dados

Os dados brutos de GC-MS foram processados utilizando o software MS-DIAL v. 4.9 (prime.psc.riken.jp), passando por etapas de processamento, alinhamento, deconvolução e identificação. Para identificar os metabólitos, adotou-se uma abordagem comparativa utilizando as bibliotecas de espectros de massa FiehnLib e NIST 2014 como referência, visando anotar compostos com uma similaridade de $\geq 85\%$, aumentando a confiança na identificação dos metabólitos nas amostras de café.

A análise dos dados foi realizada no software Metaboanalyst v. 6.0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>), onde os dados foram normalizados e as análises estatísticas e de vias metabólicas foram conduzidas. Para minimizar a perda de dados, os valores ausentes foram imputados com um valor pequeno equivalente à metade do valor positivo mínimo no conjunto de dados original, preservando o máximo de informações possível. A comparação do

conteúdo de metabólitos entre os grupos de amostras de café foi realizada através do teste T de Student, considerando um valor de $p < 0,05$ como estatisticamente significativo. Após a identificação de todos os metabólitos estatisticamente significativos, uma análise de vias metabólicas foi conduzida usando o Metaboanalyst v. 6.0, com base na biblioteca de vias metabólicas de *Arabidopsis thaliana* do *Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes* (KEGG).

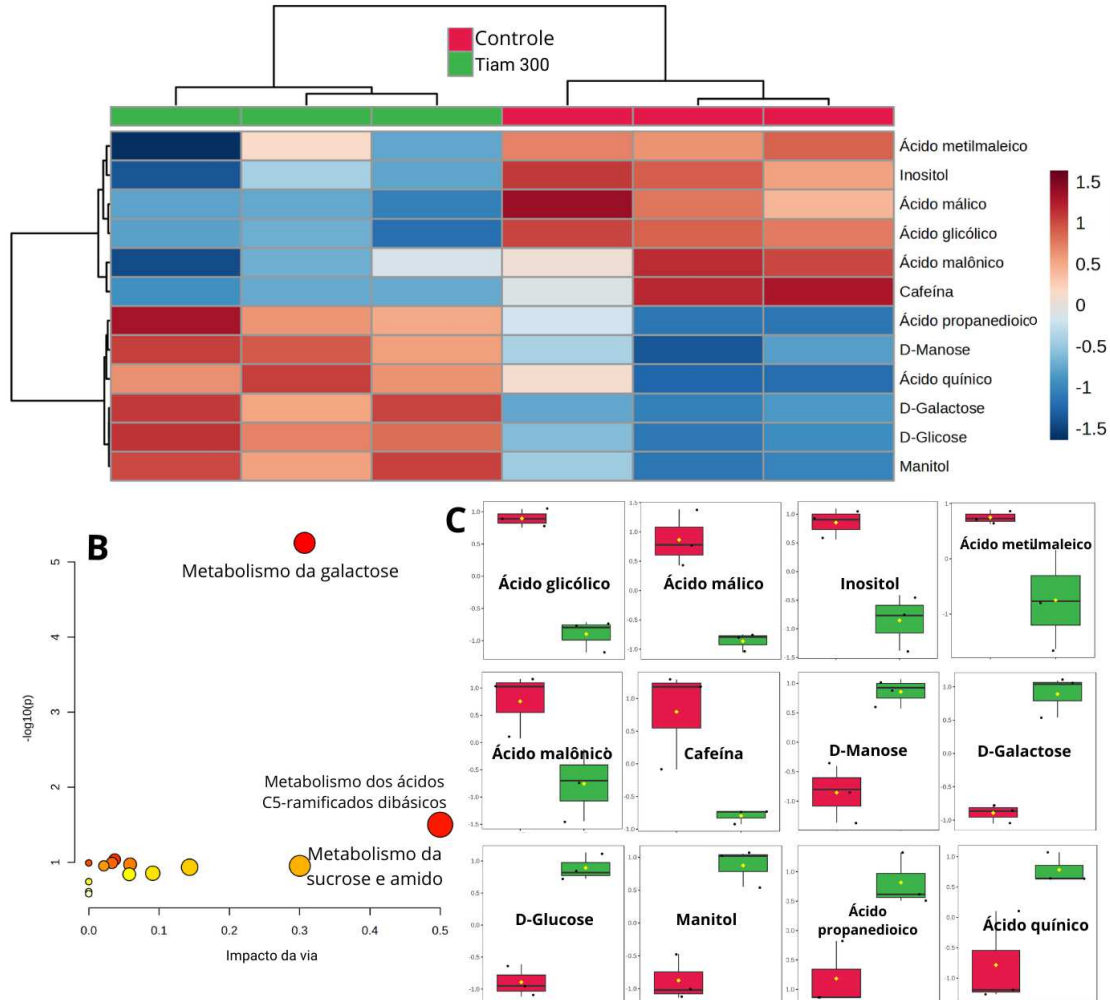
3 Resultados

3.1 Tiametoxam (Tiam. 300)/Controle

Ao comparar as amostras de folha de café tratadas com Tiam. 300 (tiametoxam 300 gramas de ingrediente ativo por hectare (g i.a ha^{-1}) e o controle, que receberam apenas água, foi notado a expressão significativa de 12 metabólitos. Desses, seis apresentaram intensidades maiores no tratamento com Tiam. 300: galactose ($p = 0,0007$; $\text{FC} = 1,477$), D-glicose ($p = 0,0007$; $\text{FC} = 1,529$), manitol ($p = 0,002$; $\text{FC} = 1,340$), D-manose ($p = 0,005$; $\text{FC} = 2,155$), ácido propanodioico ($p = 0,016$; $\text{FC} = 1,497$) e ácido quínico ($p = 0,028$; $\text{FC} = 1,184$). Por outro lado, sete metabólitos foram encontrados em menores intensidades no tratamento com Tiam. 300, refletindo um aumento no tratamento controle. Estes incluem: ácido glicólico ($p = 0,001$; $\text{FC} = 0,493$), ácido málico ($p = 0,004$; $\text{FC} = 0,576$), inositol ($p = 0,006$; $\text{FC} = 0,849$), cafeína ($p = 0,023$; $\text{FC} = 0,016$), ácido malônico ($p = 0,042$; $\text{FC} = 0,413$) e ácido metil-maleico ($p = 0,045$; $\text{FC} = 0,459$) (Figura 1A e C)

As vias metabólicas mais relevantes que diferenciam as amostras de café tratadas com Tiam. 300 e o grupo controle foram identificadas através da avaliação de enriquecimento das vias metabólicas, baseada nos metabólitos significativamente diferentes. Ao todo, 13 vias metabólicas foram identificadas, mas somente a do metabolismo da Galactose ($p = 0,0000001$) foi considerada, pois apresentou quatro metabólitos de interesse, ao contrário das outras que apresentaram apenas dois ou um metabólito (Figura 1B).

Figura 1- (A) *Heatmap* de cluster hierárquico exibindo a distribuição dos metabólitos em amostras de mudas de café tratadas com tiametoxan (300 g i.a ha⁻¹) (verde) e Controle (vermelho) e (B) representação do impacto de vias metabólicas. (C) Gráficos comparativos mostrando a intensidade dos compostos significativamente diferentes entre os dois tratamentos



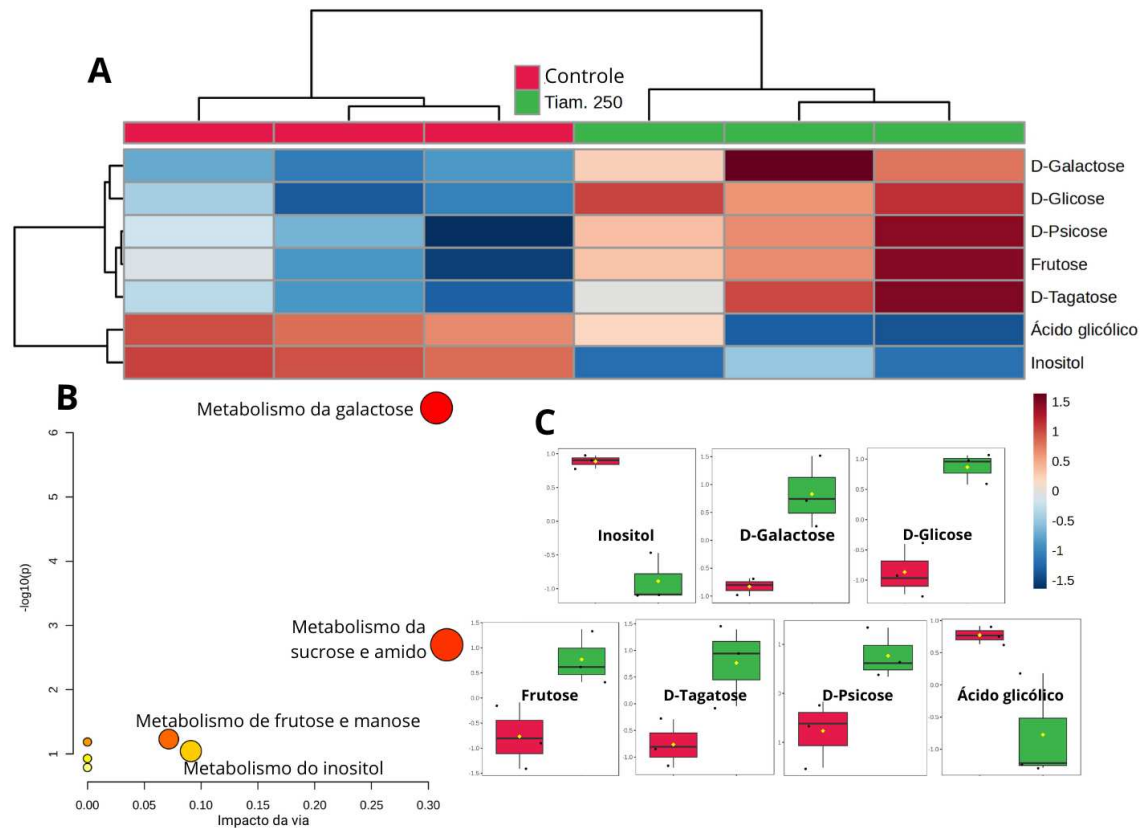
Fonte: O Autor.

3.2 Tiametoxam (Tiam 250)/Controle

Através da comparação das amostras de folha de café tratadas com Tiam. 250 (tiametoxam 250 g i.a ha⁻¹) e folhas das mudas do grupo controle, foi identificado a expressão significativa de sete metabólitos. Desses, cinco apresentaram intensidades maiores no tratamento com Tiam. 250: D-galactose ($p= 0,012$; FC= 1,398), D-glicose ($p= 0,003$; FC= 1,283), D-psicose ($p= 0,036$; FC= 1,189), D-frutose ($p= 0,035$; FC= 1,171) e D-tagatose ($p= 0,037$; FC= 1,174). Por outro lado, dois metabólitos foram encontrados em menor intensidade no tratamento com Tiam. 250, refletindo um aumento no tratamento controle. São eles, o inositol ($p= 0,001$; FC= 0,615) e o Ácido glicólico ($p= 0,033$; FC= 0,553) (Figura 2A e C).

As vias metabólicas mais relevantes que diferenciam as amostras de café tratadas com Tiam. 250 e controle foram identificadas através da avaliação de enriquecimento das vias metabólicas, baseada nos metabólitos significativamente diferentes. Sete vias metabólicas foram identificadas, mas somente a do metabolismo da galactose ($p= 0,0000001$) foi considerada, pois apresentou quatro metabólitos de interesse, ao contrário das outras que apresentaram dois ou um (Figura 2B).

Figura 2- (A) *Heatmaps* de cluster hierárquico exibindo a distribuição dos metabólitos em amostras de mudas de cafeeiro tratadas com Tiametoxan 250 (g i.a ha⁻¹) (verde) e Controle (vermelho) e (B) representação do impacto de vias metabólicas. (C) Gráficos comparativos mostrando a intensidade dos compostos significativamente diferentes entre os dois tratamentos



Fonte: O Autor.

3.3 Imidacloprido (Imid.)/Controle

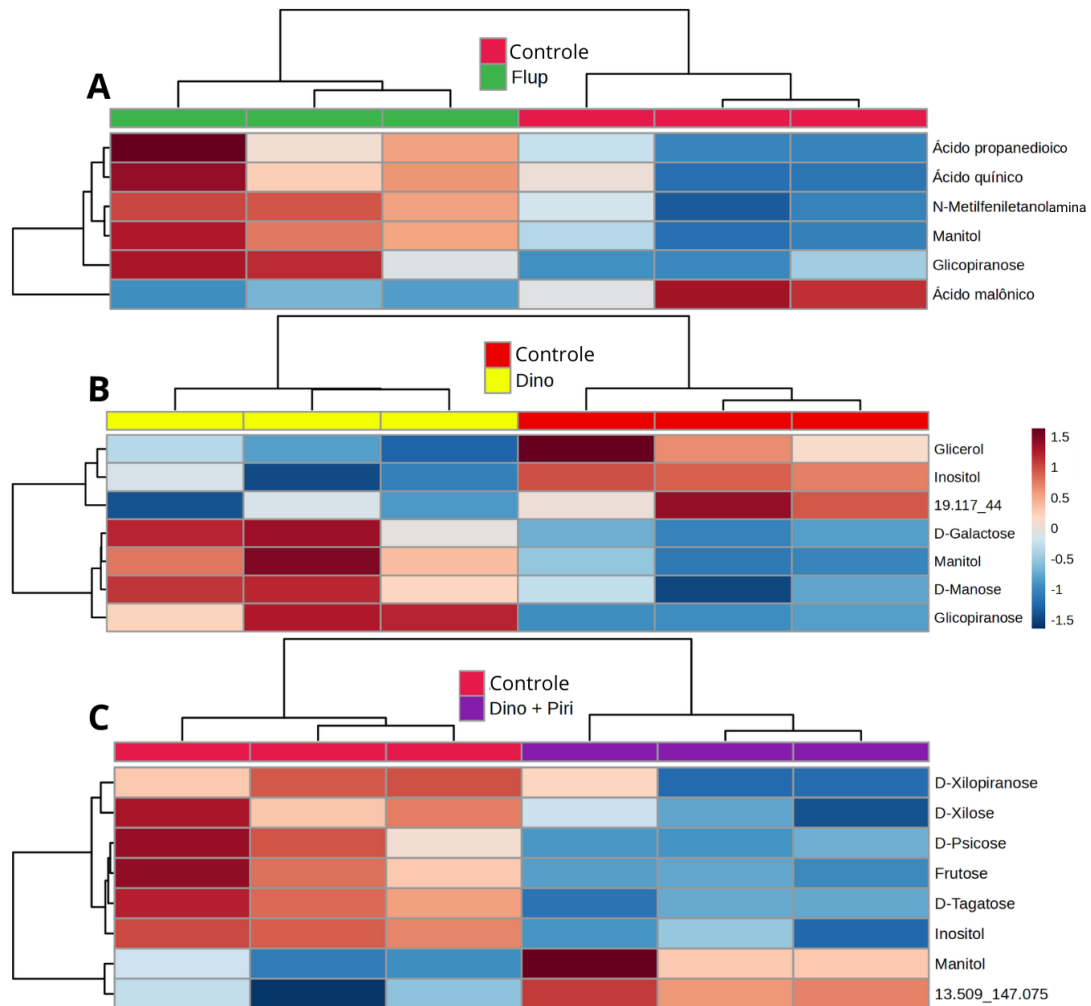
Quando comparadas as amostras de folha de café tratadas com Imid. (imidacloprido 140 g i.a ha⁻¹) e as mudas controle foi identificado a expressão significativa de 11 metabólitos. Desses, oito apresentaram intensidades maiores no tratamento com Imid: galactose ($p= 0,003$; FC= 1,333), D-frutose ($p= 0,003$; FC= 1,402), D-psicose ($p= 0,003$; FC= 1,421), D-manitol

($p= 0,005$; $FC= 1,368$), D-tagatose ($p= 0,006$; $FC= 1,4726$), D-xilose ($p= 0,006$; $FC= 1,438$), D-glicose ($p= 0,017$; $FC= 1,3757$) e ácido glucônico ($p= 0,040$; $FC= 1,329$). Por outro lado, três metabólitos foram encontrados em menor intensidade no tratamento com Imid., que foram o inositol ($p= 0,003$; $FC= 0,691$), D-xilopirranose ($p= 0,031$; $FC= 0,574$) e ácido málico ($p= 0,035$; $FC= 0,492$) (Figura 3A e C).

A análise do enriquecimento das vias metabólicas revelou diferenças significativas entre as amostras de café tratadas com Imid. e aquelas tratadas apenas com água, o controle. Das 10 vias metabólicas identificadas, apenas o metabolismo da galactose ($p= 0,0000001$) demonstrou relevância, destacando-se com a presença de quatro metabólitos de interesse em contraste com as demais vias, que apresentaram dois ou apenas um metabólito (Figura 3B).

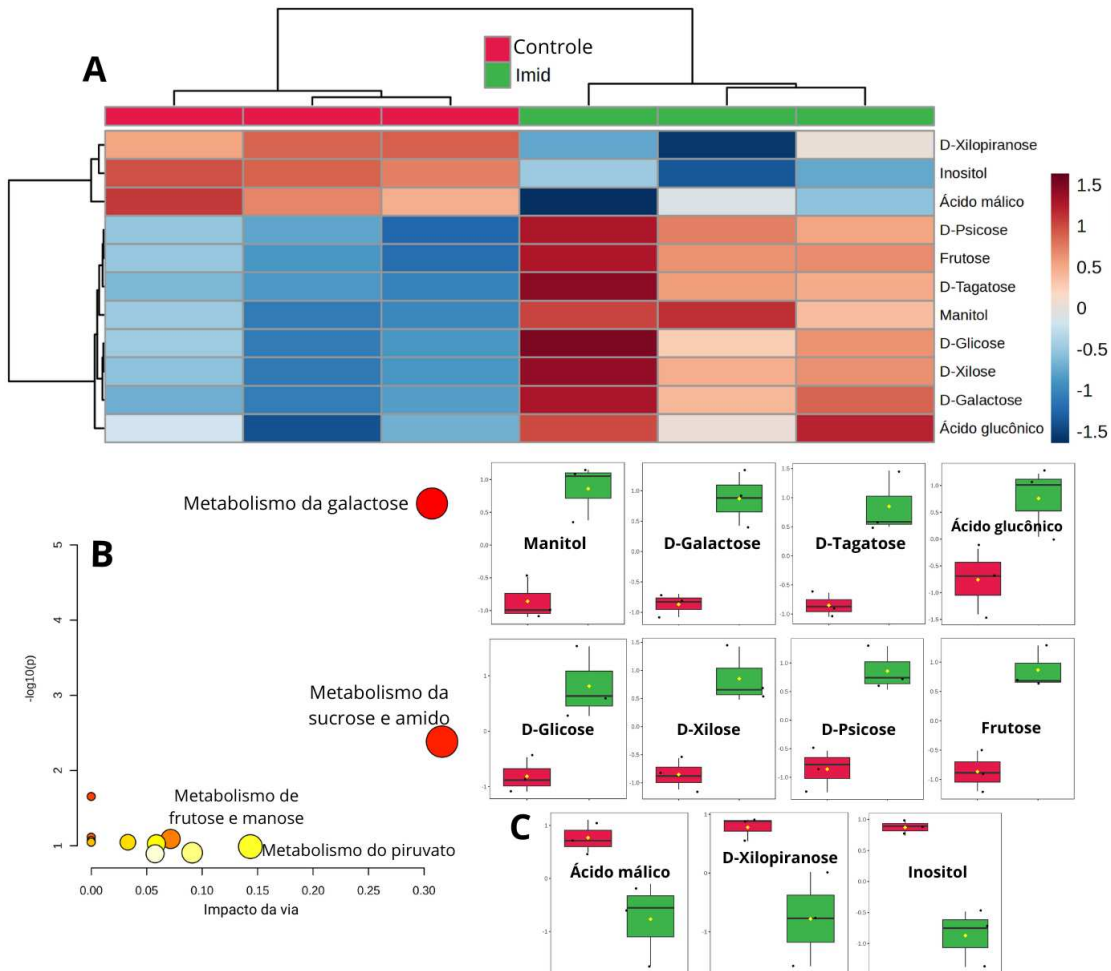
Pela comparação das amostras de folha de café tratadas com Dino. + Piri. (dinotefuram + piriproxifem 150 + 37,5 g i.a ha⁻¹) e o tratamento controle foi identificado a expressão significativa de seis metabólitos. Desses, dois compostos foram encontrados em maior intensidade nas amostras de mudas tratadas com inseticida: manitol ($p= 0,046$; $FC= 1,206$) e um composto não identificado (13.509_147.075) ($p= 0,019$; $FC= 1,908$). Por outro lado, seis metabólitos foram encontrados em menor intensidade no tratamento com Dino. + Piri.: inositol ($p= 0,001$; $FC= 0,740$), a D-tagatose ($p= 0,001$; $FC= 0,779$), frutose ($p= 0,006$; $FC= 0,812$), D-psicose ($p= 0,013$; $FC= 0,823$), D-xilose ($p= 0,023$; $FC= 0,828$) e D-Xilopirranose ($p= 0,048$; $FC= 0,750$) (Figura 4C).

Figura 4- (A) Heatmaps de cluster hierárquico exibindo a distribuição dos metabólitos em amostras de mudas de café tratado com flupiradifurona (A), dinotefuran (B) e dinotefuran + piriproxifem (B)



Fonte: O Autor.

Figura 3- (A) *Heatmaps* de cluster hierárquico exibindo a distribuição dos metabólitos em amostras de mudas de café tratado com imidacloprido 140 (g i.a ha⁻¹) (verde) e Controle (vermelho) e (B) representação do impacto de vias metabólicas. (C) Gráficos comparativos mostrando a intensidade dos compostos significativamente diferentes entre os dois tratamentos.



Fonte: O autor.

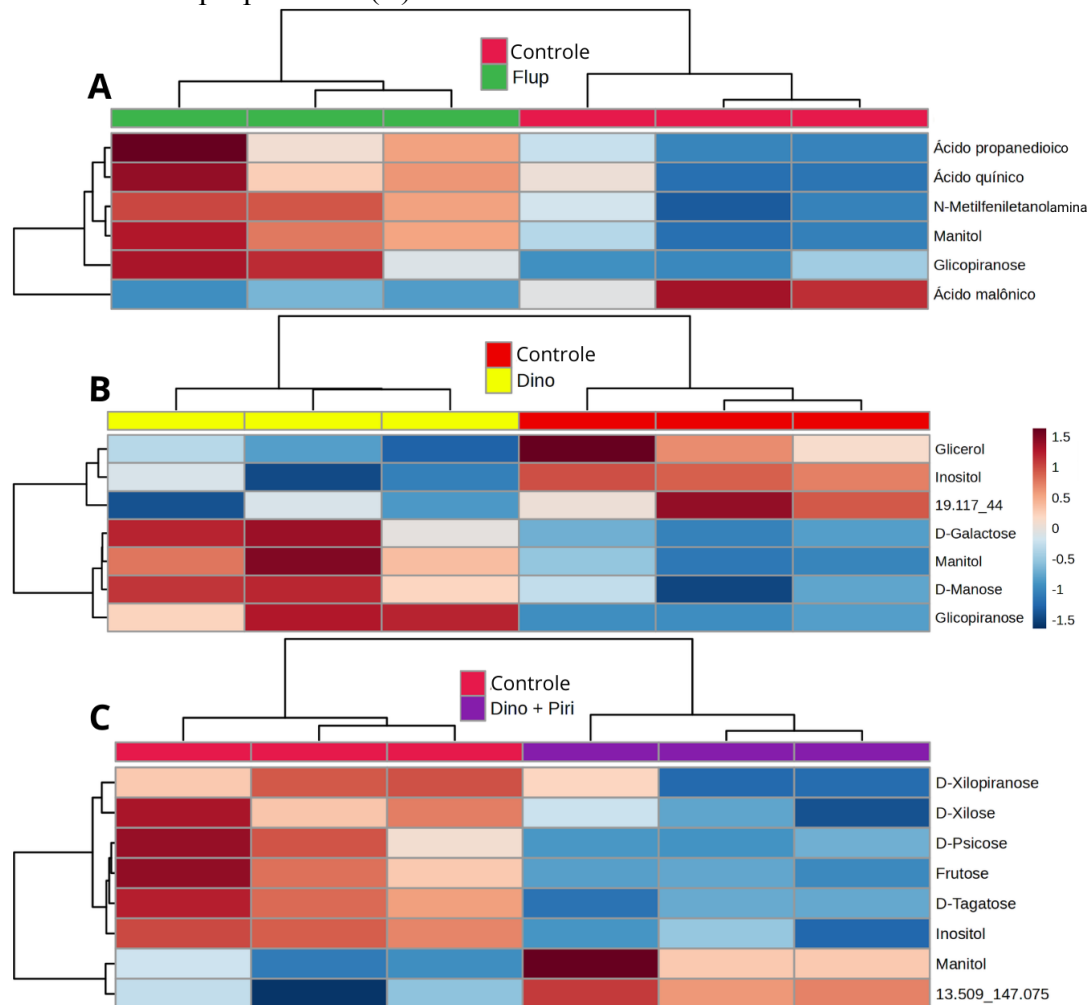
3.4 Flupiradifurona (Flup.)/Controle, Dinotefuran (Dino.)/Controle e Dinotefuran + piriproxifem (Dino. + Piri.)/Controle

Quando comparadas amostras das folhas das mudas que foram tratadas com Flup. (flupiradifurona 300 g i.a ha⁻¹) e as mudas do grupo controle foi identificada a expressão significativa de seis metabólitos. Sendo que cinco deles apresentaram intensidades maiores no tratamento com o inseticida: manitol ($p= 0,0071$; FC= 1,258), N-metilfeniletanolamina ($p= 0,011$; FC= 2,342), glucopiranoose ($p= 0,030$; FC= 1,158), ácido propanodióico ($p= 0,045$; FC= 1,607) e ácido quínico ($p= 0,044$; FC= 1,204). Nessa análise, apenas o ácido malônico ($p= 0,021$; FC= 0,454) foi encontrado em menor intensidade nas folhas das mudas tratadas

com o Flup., logo, com maior intensidade nas folhas das mudas do tratamento controle (Figura 5A).

Nas amostras de folhas das mudas tratadas com Dino. (Dinotefuran 175 g i.a ha⁻¹) e o controle foram identificados a expressão significativa de sete metabólitos. Entre os metabólitos expressos, quatro, glicopirranose ($p= 0,006$; FC= 2,023), manitol ($p= 0,008$; FC= 1,406), D-galactose ($p= 0,019$; FC= 1,368) e D-manose ($p= 0,024$; FC= 1,821), maiores apresentaram intensidades nas folhas das mudas que receberam aplicação do inseticida. Porém, três dos compostos expressos, o inositol ($p= 0,012$; FC= 0,698), o glicerol ($p= 0,035$; FC= 0,650) e um composto não identificado (19.117_44) ($p= 0,043$; FC= 0,254), foram encontrados com menor intensidade nas folhas das mudas tratadas com o inseticida a base do dinotefuran (Figura 4B).

Figura 4- (A) Heatmaps de cluster hierárquico exibindo a distribuição dos metabólitos em amostras de mudas de café tratado com flupiradifurona (A), dinotefuran (B) e dinotefuran + piriproxifem (B)



Fonte: O autor.

4 Discussão

A metabolômica é uma ferramenta poderosa para compreensão abrangente dos mecanismos biológicos dos organismos em resposta a uma variedade de alterações externas, capturando até mesmo mudanças sutis que reflitam o estado fisiológico de um organismo em nível molecular (Hall, 2006; Majumdar; Keller, 2020; Matich et al., 2019). No entanto, a aplicação de estudos metabolômicos para investigar os efeitos de xenobióticos, como os inseticidas, nas plantas de café são escassos. Considerando a vasta literatura sobre os efeitos de inseticidas, especialmente neonicotinóides, na morfofisiologia e no metaboloma de plantas, bem como sua suposta atividade bioativadora no cafeeiro (Guo et al., 2020; Leite et al., 2022; Li et al., 2019; Li et al., 2024a) foi decidido avaliar o metaboloma de mudas de café submetidas à aplicação desses inseticidas comumente utilizados no controle do bicho-mineiro do café.

Observou-se um aumento na expressão de vários açúcares livres pelas mudas quando tratadas com os inseticidas neonicotinóides (Figura 1A e C, 2A e C, 3A e C, 4B e 4C). Nas plantas, tal como nos mamíferos, os neonicotinóides são convertidos em uma ampla variedade de metabólitos e afetam a expressão de vários genes em plantas (Ford; Casida, 2008; Li et al., 2019; Szczepaniec et al., 2013). Esses resultados são consistentes com outros estudos que também relataram aumento de açúcares livres em plantas após a aplicação de inseticidas neonicotinóides (Li et al., 2024a; Li et al., 2024b). Os açúcares solúveis desempenham um papel fundamental como forma de armazenamento de energia e como substâncias de transporte. Além disso, têm importantes funções na manutenção das atividades vitais e do equilíbrio osmótico, regulando o crescimento e desenvolvimento das plantas e modulando a sinalização e transdução intracelular (Skliros et al., 2018).

Estímulos ambientais podem influenciar diversos processos bioquímicos, frequentemente interferindo na quantidade e distribuição equilibrada de açúcares nas células vegetais, assim como no seu transporte dos órgãos fonte para os órgãos coletores (Jeandet et al., 2022). Diversos estudos demonstraram que os açúcares desempenham um papel fundamental nas respostas de defesa das plantas a estresses abióticos e bióticos (Chen et al., 2010; Kopecká et al., 2023; Keller et al., 2021; Sami et al., 2016). O estresse abiótico muitas vezes induz o acúmulo de açúcares solúveis e polióis nas plantas, como sacarose, glicose, trealose, frutose, manitol, sorbitol e inositol, que estão frequentemente relacionados à resistência a condições estressantes para as plantas (Sami et al., 2016; Kopecká et al., 2023). Neste contexto, o aumento da expressão de açúcares observado neste estudo sugere que a

aplicação dos inseticidas tenha desencadeado uma situação de estresse para as mudas de café, mesmo que branda. Esse fato também pode estar relacionado aos relatos de que inseticidas neonicotinoides poderiam aumentar a resistência de plantas a estresses ambientais (El-Basyouni et al., 2021; House; Swanton; Lukens, 2021; Qiu et al., 2024).

Quando comparados os grupos tratados com Tiam. 250 (Tiametoxam (250 g i.a ha⁻¹), Tiam.300 (tiametoxam 300 g i.a ha⁻¹), Imid. (imidacloprido 140 g i.a ha⁻¹) e os grupos controle, tratadas apenas com água, foi observado que os inseticidas causaram perturbações em algumas vias metabólicas, com destaque na via metabólica da galactose, que foi a via mais significativamente alterada (Figura 1B, 2B e 3B). Já foi relatada em algumas espécies a capacidade do tiametoxam de interferir em rotas metabólicas de diversos carboidratos, incluindo na via metabólica da galactose (Ge et al., 2019). As plantas desenvolveram mecanismos sofisticados para detectar os níveis de açúcar e ajustá-los em resposta a sinais tanto de desenvolvimento interno quanto do ambiente circundante (Ruan, 2014). A sensibilidade das plantas a diferentes concentrações de açúcares depende do açúcar específico envolvido (Wingler; Henriques, 2022). Por exemplo, na planta modelo *Arabidopsis thaliana*, uma baixa concentração de galactose pode desencadear um efeito inibitório no crescimento da raiz e altas concentrações de galactoses, também, podem desencadear efeitos fisiológicos deletérios como a inibição do crescimento de raízes ou brotos (Egert et al., 2012; Rosti et al., 2007; Yamada et al., 2011). No entanto, o mecanismo pelo qual a baixa concentração de galactose inibe o crescimento das plantas não foi completamente caracterizado (Wang et al., 2022).

No cafeeiro, a galactose desempenha um papel multifacetado no metabolismo, sendo essencial para o crescimento, desenvolvimento e produção de cafeína, além de contribuir para a resistência e adaptação da planta ao ambiente. No entanto, no contexto do café, os estudos sobre a importância da galactose estão relacionados à qualidade dos frutos (Li et al., 2021). Isso se deve ao fato da galactose ser componente de galactomananas, que constituem cerca de 50% do peso seco do café presentes na parede celular (Redgwell; Fischer, 2006). A composição da parede celular está intimamente associada ao sabor e a qualidade da bebida do café (Li et al., 2021; Maksimowski et al., 2022). Outro composto formado por galactose é o galactinol, que pode ser utilizado como marcador da qualidade da bebida e fornece um método de triagem precoce para avaliar a qualidade da bebida (Amalia et al., 2023).

Os resultados do estudo revelaram uma diminuição na expressão de cafeína no grupo tratado com Tiam. 300 (Figura A e C). No entanto, essa redução não foi observada quando comparados os demais metabolomas, incluindo o do grupo Tiam. 250. A cafeína (1,3,7-

trimetilxantina) é um dos componentes alcalóides mais significativos nas folhas e sementes de café, representando 2 a 4% do peso seco nas folhas e 1 a 2% nas sementes de café (Saud et al., 2021). Este composto é compartilhado pelas diversas bebidas populares e é considerado o alcalóide vegetal mais econômico e benéfico (Hakobyan et al., 2022). Em plantas, a cafeína é sintetizada em vários tecidos das plantas, principalmente folhas jovens, flores e sementes (Zhang et al., 2022b), e desempenha um papel essencial na proteção dos tecidos moles contra a infecção por herbívoros, patógenos bacterianos e fungos, além de estar envolvida na transdução de sinal com sementes de plantas próximas no solo (Zhou et al., 2020).

Várias rotas de biossíntese de cafeína já foram identificadas no cafeeiro, sendo as mais comuns aquelas que envolvem reações de metilação para converter sequencialmente xantosina em 7-metilxantina, depois em teobromina e finalmente em cafeína, usando S-adenosil-L-metionina como doadora de metilação (Zhou et al., 2020; Denoeud et al., 2014; Wei et al., 2018). No genoma das plantas de café foram identificados 19 genes envolvidos na biossíntese e 18 genes envolvidos na degradação no metabolismo da cafeína (Zhang et al., 2022b). Diversos fatores estão relacionados a redução ou aumento da síntese de cafeína pelo cafeeiro e, geralmente, a redução na cafeína nas folhas e frutos do café pode resultar na diminuição da capacidade de dissuasão das pragas em infestar as plantas (Vega et al., 2020).

Nossos resultados mostram que os inseticidas, que são frequentemente usados no manejo de bicho-mineiro, também provocam alterações no metabolismo das plantas hospedeiras. Esses resultados são muito interessantes no contexto de Manejo Integrado de Praga, uma vez que tais inseticidas são alvos de diversos questionamentos e, muitas vezes, pressuposições de efeitos fitotônicos, sendo um bioativadores do desenvolvimento. Fato que levanta preocupações sobre o uso indevido dessa tecnologia importe para nossa cafeicultura (Leite et al., 2022). Os resultados encontrados nesse estudo podem auxiliar a responder várias questões sobre o uso de inseticidas no cafeeiro e fundamentar trabalhos futuros sobre o manejo integrado de pragas (MIP) na cultura do café.

5. Conclusões

A aplicação de inseticidas a base de tiametoxam 300 g i.a ha⁻¹, tiametoxam 250 g i.a ha⁻¹, imidacloprido, flupdifurona, dinotefuran e dinotefuran + piriproxifem, nas condições avaliadas, provocam aumento da expressão de açúcares livres nas mudas de café arábica Catuaí Vermelho IAC 144.

Tiametoxam 300 g i a ha⁻¹, provoca aumento da expressão de galactose D-galactose, D-glucose, manitol, D-manose, ácido propanodioico e ácido quínico, mas reduz a expressão de ácido glicólico, ácido málico, inositol, cafeína, D-galactose, ácido malônico, ácido metil-maleico nas mudas.

Tiametoxam 250 g i.a ha⁻¹, provoca aumento da expressão dos metabolitos D-galactose, D-glucose, D-psicose, frutose e D-tagatose, porem reduz a expressão de inositol, ácido glicólico.

O imidacloprido aumenta a expressão dos açúcares D-galactose, frutose, D-psicose, manitol, D-tagatose, D-xilose, D-glucose e ácido glucônico, mas reduz a expressão de inositol, D-xilopiranos e ácido málico.

Flupdifurona provoca aumento da expressão dos metabolitos mannitol, N-Metilfeniletanolamina, glucopiranos e ácido propanodioico, porém provoca redução da expressão de ácido malônico e formamide.

Dinotefuran em doses recomendadas aumenta a expressão dos compostos glucopiranos, mannitol, D-galactose, D-manose, mas reduz a expressão de inositol e glicerol.

Dinotefuran + piriproxifem procou aumento das expressões de um composto que não foi indetificado (13.509_147.075), porem causou a redução de inositol, D-tagatose, frutose, D-psicose e D-xilose.

Os inseticidas neonicotinoides a base de tiametoxam e imidacloprido provocaram alterações na via metabólica da Galactose em mudas café Catuaí Vermelho IAC 144 nas concentrações recomendadas para a cultura do café sob as condições experimentais avaliadas.

Referências

ADDY-ORDUNA, L. M.; BRODEUR, J. C.; MATEO, R. Oral acute toxicity of imidacloprid, thiamethoxam and clothianidin in eared doves: a contribution for the risk assessment of neonicotinoids in birds. **Science of the total environment**, v. 650, p. 1216-1223, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.112>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971833554X>. Acesso em: 25 jan. 2024.

AGATHOKLEOUS, E.; CALABRESE, E. J. Hormesis: a general biological principle. **Chemical Research in Toxicology**, v. 35, p. 547-549, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.2c00032>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.chemrestox.2c00032>. Acesso em: 25 jan. 2024.

AGATHOKLEOUS, E. Environmental hormesis, a fundamental non-monotonic biological phenomenon with implications in ecotoxicology and environmental safety. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 148, p. 1042-1053, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651317308333>. Acesso em: 25 jan. 2024.

AGROFIT. **Sistema De Agrotóxicos Fitossanitários**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2024. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons Acesso em: 23, fevereiro de 2023.

AMALIA, F.; IRIFUNE, T.; TAKEGAMI, T.; YUSIANTO, SUMIRAT, U.; PUTRI, S. P.; FUKUSAKI, E. Identification of potential quality markers in Indonesia's Arabica specialty coffee using GC/MS-based metabolomics approach. **Metabolomics**, v. 19, p. 90, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11306-023-02051-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11306-023-02051-5>. Acesso em: 25 jan. 2024.

ANNAMALAI, M.; VASANTHA-SRINIVASAN, P.; THANIGAIVEL, A.; MUTHIAH, C.; KARTHI, S.; JENA, M.; PANDI, G. G. P.; ADAK, T.; MURUGESAN, A. G.; SENTHIL-NATHAN, S. Effect of thiamethoxam on growth, biomass of rice varieties and its specialized herbivore, *Scirpophaga incertulas* Walker. **Physiological and molecular plant pathology**, v. 101, p. 146-155, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.10.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0885576517301212>. Acesso em: 25 jan. 2024.

BAE, J. H. PARK, J. H.; IM, S. S.; SONG, D. K. Coffee and health. **Integrative medicine research**, v. 3, p. 189-191, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imr.2014.08.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213422014000456>. Acesso em: 25 jan. 2024.

BRAGANÇA, I.; GROSSO, C.; REDE, D.; SOUSA, S. R.; LEMOS, P. C.; DOMINGUES, V. F.; DELERUE-MATOS, C. Ecotoxicological effects of insecticides in plants assessed by germination and other phytotoxicity tools. In: VATS, S. (Ed.). **Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants**. Singapore: Springer, 2018. p. 47-76. DOI: <https://doi.org/10.1007/978->

981-10-9029-5_3. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-9029-5_3#citeas. Acesso em: 25 jan. 2024.

CALVO-AGUDO, M.; GONZÁLEZ-CABRERA, J.; PICÓ, Y.; CALATAYUD-VERNICH, P.; URBANEJA, A.; DICKE, M.; TENA, A. Neonicotinoids in excretion product of phloem-feeding insects kill beneficial insects. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, p. 16817-16822, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1904298116>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1904298116>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CAPPELLETTI, S.; DARIA, P.; SANI, G.; AROMATARIO, M. Caffeine: cognitive and physical performance enhancer or psychoactive drug?. **Current neuropharmacology**, v. 13, p. 71-88, 2015. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/ben/cn/2015/00000013/00000001/art00009>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CASIDA, J. E. Neonicotinoids and other insect nicotinic receptor competitive modulators: progress and prospects. **Annual Review of Entomology**, v. 63, p. 125-144, 2018. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043042>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-ento-020117-043042>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CASTRO-MORETTI, F. R.; COCURON, J. C.; VEGA, F. E.; ALONSO, A. P. Differential metabolic responses caused by the most important insect pest of coffee worldwide, the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*). **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 68, p. 2597-2605, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07363>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.9b07363>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CHEN, L. Q.; HOU, B. H.; LALONDE, S.; TAKANAGA, H.; HARTUNG, M. L.; QU, X. Q.; GUO, W.-J.; KIM, J.-G.; UNDERWOOD, W.; CHAUDHURI, B.; CHERMAK, D.; ANTONY, G.; WHITE, F. F.; SOMERVILLE, S. C.; MUDGETT, M. B.; FROMMER, W. B. Sugar transporters for intercellular exchange and nutrition of pathogens. **Nature**, v. 468, p. 527-532, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature09606>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature09606>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CONAB – **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: Acesso em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 25 jan. 2024.

DENOEUDE, F.; CARRETERO-PAULET, L.; DEREPPER, A.; DROC, G.; GUYOT, R.; PIETRELLA, M.; ZHENG, C.; ALBERTI, A.; ANTHONY, F.; APREA, G.; AURY, J.-M.; BENTO, P.; BERNARD, M.; BOCS, S.; CAMPA, C.; CENCI, A.; COMBES, M.-C.; CROUZILLAT, D.; DA SILVA, C.; DADDIEGO, L.; DE BELLIS, F.; DUSSERT, S.; GARSMEUR, O.; GAYRAUD, T.; GUIGNON, V.; JAHN, K.; JAMILLOUX, V.; JOËT, T.; LABADIE, K.; LAN, T.; LECLERCQ, J.; LEPELLEY, M.; LEROY, T.; LI, L.-T.; LIBRADO, P.; LOPEZ, L.; MUÑOZ, A.; NOEL, B.; PALLAVICINI, A.; PERROTTA, G.; PONCET, V.; POT, D.; PRIYONO; RIGOREAU, M.; ROUARD, M.; ROZAS, J.; TRANCHANT-DUBREUIL, C.; VANBUREN, R.; ZHANG, Q.; ANDRADE, A. C.; ARGOUT, X.; BERTRAND, B.; DE KOCHKO, A.; GRAZIOSI, G.; HENRY, R. J.; JAYARAMA; MING, R.; NAGAI, C.; ROUNSLEY, S.; SANKOFF, D.; GIULIANO, G.; ALBERT, V. A.; WINCKER, P.; LASHERMES, P. The coffee genome provides insight into the convergent evolution of caffeine biosynthesis. **Science**, v. 345, p. 1181-1184, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.1126/science.125527>. Disponível em:
<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1255274>. Acesso em: 25 jan. 2024.

DHUNGANA, S. K.; KIM, I. D.; KWAK, H. S.; SHIN, D. H. Unraveling the effect of structurally different classes of insecticide on germination and early plant growth of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 130, p. 39-43, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.12.002>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048357515300754>. Acesso em: 25 jan. 2024.

EGERT, A.; PETERS, S.; GUYOT, C.; STIEGER, B.; KELLER, F. An Arabidopsis T-DNA insertion mutant for galactokinase (AtGALK, At3g06580) hyperaccumulates free galactose and is insensitive to exogenous galactose. **Plant and cell physiology**, v. 53, p. 921-929, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcs036>. Disponível em:
<https://academic.oup.com/pcp/article/53/5/921/1944285?login=false>. Acesso em: 25 jan. 2024.

EL-BASYOUNI, S. A.; MASSOUD, A. H.; EL-ZAHI, E. Z. S.; AL-KADY, M. F. Neonicotinoids insecticides for enhancing cotton plant tolerance against water-deficit stress. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 30, p. 6399-6409, 2021. Disponível em:
https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Foad-4/publication/352546173_NEONICOTINOIDS_INSECTICIDES_FOR_ENHANCING_COTTON_PLANT_TOLERANCE_AGAINST_WATER-DEFICIT_STRESS/links/60ed346516f9f313007c4268/NEONICOTINOIDS-INSECTICIDES-FOR-ENHANCING-COTTON-PLANT-TOLERANCE-AGAINST-WATER-DEFICIT-STRESS.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

FARAG, M. A.; ZAYED, A.; SALLAM, I. E.; ABDELWARETH, A.; WESSJOHANN, L. A. Metabolomics-based approach for coffee beverage improvement in the context of processing, brewing methods, and quality attributes. **Foods**, v. 11, p. 864, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11060864>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/6/864>. Acesso em: 25 jan. 2024.

FARIAS, E. S.; FERNANDES, A. F.; ANDRADE, E. D.; PICANÇO, M. C.; CARVALHO, G. A. Comparative toxicity of coffee insecticides to the green lacewing *Chrysoperla externa* in laboratory and persistence trials. **Crop Protection**, v. 172, p. 106336, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106336>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026121942300159X>. Acesso em: 25 jan. 2024.

FORD, K. A.; CASIDA, J. E. Comparative metabolism and pharmacokinetics of seven neonicotinoid insecticides in spinach. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, p. 10168-10175, 2008. DOI: <https://doi-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/10.1021/jf8020909>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf8020909>. Acesso em: 25 jan. 2024.

FORD, K. A.; GULEVICH, A. G.; SWENSON, T. L.; CASIDA, J. E. Neonicotinoid insecticides: oxidative stress in planta and metallo-oxidase inhibition. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 59, p. 4860-4867, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf200485k>. Disponível em:
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf200485k>. Acesso em: 25 jan. 2024.

FRAGOSO, D. B.; GUEDES, R. N. C.; PICANÇO, M. C.; ZAMBOLIM, L. Insecticide use and organophosphate resistance in the coffee leaf miner *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Bulletin of Entomological Research**, v. 92, p. 203–212, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1079/BER2002156>. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/bulletin-of-entomological-research/article/abs/insecticide-use-and-organophosphate-resistance-in-the-coffee-leaf-miner-leucoptera-coffeella-lepidoptera-lyonetiidae/A094F782C53557AB170BC7C6A8A9C4DD>. Acesso em: 25 jan. 2024.

GE, G.; JIAO, W.; CUI, C.; LIAO, G.; SUN, J.; HOU, R. Thiamethoxam metabolism and metabolic effects in cell suspension culture of tea (*Camellia sinensis* L.). **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 67, p. 7538-7546, 2019. DOI: <https://doi-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/10.1021/acs.jafc.8b07011>. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.8b07011>. Acesso em: 25 jan. 2024.

GODÓI, C. T. D.; CAMPOS, S. O.; MONTEIRO, S. H.; RONCHI, C. P.; SILVA, A. A.; GUEDES, R. N. C. Thiamethoxam in soybean seed treatment: Plant bioactivation and hormesis, besides whitefly control?. **Science of The Total Environment**, v. 857, p. 159443, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159443>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722065421>. Acesso em: 25 jan. 2024.

GREEN, P. W.; DAVIS, A. P.; COSSE, A. A.; VEGA, F. E. Can coffee chemical compounds and insecticidal plants be harnessed for control of major coffee pests?. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, p. 9427-9434, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b03914>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.5b03914>. Acesso em: 25 jan. 2024.

GUO, Q.; ELE, Z.; LIU, X.; LIU, B.; ZHANG, Y. High-throughput untargeted metabolomic study of the effects of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on the metabolic characteristics of *A. thaliana* leaves. **Science of the Total Environment**, v. 710, p. 135542, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135542>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719355366>. Acesso em: 25 jan. 2024.

HAKOBYAN, N.; GEVORGYAN, S.; PETROSYAN, L.; KHACHATRYAN, A. The problem of personal development in the context of social anomie. **Wisdom**, v. 2, 7-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24234/wisdom.v2i2.749>. Disponível em: <https://cyberleninka.ru/article/n/the-problem-of-personal-development-in-the-context-of-social-anomie/viewer>. Acesso em: 25 jan. 2024.

HALL, R. D. Plant metabolomics: from holistic hope, to hype, to hot topic. **New phytologist**, v. 169, p. 453-468, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01632.x>. Disponível em: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1469-8137.2005.01632.x>. Acesso em: 25 jan. 2024.

HOUSE, M. A.; SWANTON, C. J.; LUKENS, L. N. The neonicotinoid insecticide thiamethoxam enhances expression of stress-response genes in *Zea mays* in an environmentally specific pattern. **Genome**, v. 64, p. 567-579, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1139/gen-2020-0110>. Disponível em:
<https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/gen-2020-0110>. Acesso em: 25 jan. 2024.

INFANTE, F.; PÉREZ, J.; VEGA, F. E. The coffee berry borer: the centenary of a biological invasion in Brazil. **Brazilian journal of Biology**, v. 74, p. S125-S126, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.15913>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/hym7CnnkKFkG8wnKsPFGQCm/?lang=en>. Acesso em: 25 jan. 2024.

JAZAYERI, S. M.; OVIEDO-BAYAS, B.; GUERRERO-CHUEZ, R.; TORRES-NAVARRETE, Y.; VILLAMAR-TORRES, R. O. Environmental Factors Enhance Production of Plant Secondary Metabolites Toward More Tolerance and Human Health: Cocoa and Coffee Two Model Species. In: MADDELA, N. R.; GARCÍA, L.C. (Eds). **Innovations in Biotechnology for a Sustainable Future**. Cham: Springer, 2021. p. 155-183. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-80108-3_9. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-80108-3_9#citeas. Acesso em: 25 jan. 2024.

JEANDET, P.; FORMELA-LUBOÍŃSKA, M.; LABUDDA, M.; MORKUNAS, I. The role of sugars in plant responses to stress and their regulatory function during development. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, p. 5161, p. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23095161>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/9/5161>. Acesso em: 25 jan. 2024.

KELLER, I.; RODRIGUES, C. M.; NEUHAUS, H. E.; POMMERRENIG, B. Improved resource allocation and stabilization of yield under abiotic stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 257, p. 153336, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153336>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161720302261>. Acesso em: 25 jan. 2024.

KOPECKÁ, R.; KAMENIAROVÁ, M.; ČERNÝ, M.; BRZOBOHATÝ, B.; NOVÁK, J. Abiotic stress in crop production. **International Journal of Molecular Sciences**, p. 24, p. 6603, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24076603>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/7/6603>. Acesso em: 25 jan. 2024.

KRUPKE, C. H.; HUNT, G.J.; EITZER, B. D.; ANDINO, G.; GIVEN, K. Multiple routes of pesticide exposure for honey bees living near agricultural fields. **PLoS One**, v. 7, p. e29268, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029268>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0029268>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LANKA, S. K.; SENTHIL-NATHAN, S.; BLOUIN, D. J.; STOUT, M. J. Impact of thiamethoxam seed treatment on growth and yield of rice, *Oryza sativa*. **Journal of economic entomology**, v. 110, p. 479-486, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/tox043>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jee/article-abstract/110/2/479/3053355?login=false>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LEITE, S. A.; GUEDES, R. N. C.; DA COSTA, D. R.; COLMENAREZ, Y. C.; MATSUMOTO, S. N.; DOS SANTOS, M. P.; COELHO, B. S.; MOREIRA, A. A.; CASTELLAN M. A. The effects of thiamethoxam on coffee seedling morphology and

Neotropical leaf miner (*Leucoptera coffeella*) infestations. **Pest Management Science**, v. 78, p. 2581-2587, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.6889>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.6889>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LI, Y.; LONG, L.; GE, J.; LI, H.; ZHANG, M.; WAN, Q.; YU, X. Effect of imidacloprid uptake from contaminated soils on plant growth. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 67, p. 7232-7242, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00747>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.9b00747>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LI, Z.; ZHANG, C.; ZHANG, Y.; ZENG, W.; CESARINO, I. Coffee cell walls—composition, influence on cup quality and opportunities for coffee improvements. **Food Quality and Safety**, 5, p. fyab012. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyab012>. Disponível em: <https://academic.oup.com/fqs/article/doi/10.1093/fqsafe/fyab012/6293767?login=false>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LI, L.; YIN, S.; PAN, W.; WANG, F.; FAN, J. Comprehensive metabolome and growth effects of thiamethoxam uptake and accumulation from soil on pak choi. **Food Chemistry**, v. 433, p. 137286, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137286>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814623019040>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LI, L.; YIN, S.; KANG, S.; CHEN, Z.; WANG, F.; PAN, W. Comprehensive effects of thiamethoxam from contaminated soil on lettuce growth and metabolism. **Environmental Pollution**, v. 343, p.123186, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137286>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814623019040>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LIU, N.; ZHU, L. Metabolomic and transcriptomic investigation of metabolic perturbations in *Oryza sativa* L. triggered by three pesticides. **Environmental science & technology**, v. 54, p. 6115-6124, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00425>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.0c00425>. Acesso em: 25 jan. 2024.

LU, W.; LIU, Z.; FAN, X.; ZHANG, X.; QIAO, X.; HUANG, J. Nicotinic acetylcholine receptor modulator insecticides act on diverse receptor subtypes with distinct subunit compositions. **PLoS Genetics**, v. 18, p. e1009920, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1009920>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosgenetics/article?id=10.1371/journal.pgen.1009920>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MACEDO, W. R.; CASTRO, P. R. de C. Thiamethoxam: Molecule moderator of growth, metabolism and production of spring wheat. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 100, p. 299-304, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2011.05.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048357511000939>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MACEDO, W. R.; ARAÚJO, D. K.; CASTRO, P. R. D. C. Unravelling the physiologic and metabolic action of thiamethoxam on rice plants. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.

107, p. 244-249, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2013.08.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048357513001442>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MAHMUD, M. M. C.; SHELLIE, R. A.; KEAST, R. Unravelling the relationship between aroma compounds and consumer acceptance: Coffee as an example. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, p. 2380-2420, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12595>. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1541-4337.12595>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MAJUMDAR, S.; KELLER A. A. Omics to address the opportunities and challenges of nanotechnology in agriculture. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 51, p. 2595-2636, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1785264>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2020.1785264>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MAKSIMOWSKI, D.; PACHURA, N.; OZIEMBŁOWSKI, M.; NAWIRSKA-OLSZAŃSKA, A.; SZUMNY, A. Coffee roasting and extraction as a factor in cold brew coffee quality. **Applied Sciences**, v. 12, p. 2582, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052582>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/5/2582>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MATICH, E. K.; SORIA, N. G. C.; AGA, D. S.; ATILLA-GOKCUMEN, G. E. Applications of metabolomics in assessing ecological effects of emerging contaminants and pollutants on plants. **Journal of hazardous materials**, v. 373, p. 527-535, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.084>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389419302274>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MATSUDA, K.; IHARA, M.; SATTELLE, D. B. Neonicotinoid insecticides: molecular targets, resistance, and toxicity. **Annual review of pharmacology and toxicology**, v. 60, p. 241-255, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-010818-021747>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-pharmtox-010818-021747>. Acesso em: 25 jan. 2024.

PEREIRA, S. I.; FIGUEIREDO, P. I.; BARROS, A. S.; DIAS, M. C.; SANTOS, C., DUARTE, I. F.; GIL, A. M. Changes in the metabolome of lettuce leaves due to exposure to mancozeb pesticide. **Food Chemistry**, v. 154, p. 291-298, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814614000259>. Acesso em: 25 jan. 2024.

QIU, H.; SUN, C.; DORMATEY, R.; BAI, J.; BI, Z.; LIU, Y.; LIU, Z.; WEI, J.; MAO, S. YAO, P. Thiamethoxam Application Improves Yield and Drought Resistance of Potatoes (*Solanum tuberosum* L.). **Plants**, v. 13, p. 477, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13040477>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/4/477>. Acesso em: 25 jan. 2024.

REDGWELL, R. J.; FISCHER, M. Coffee carbohydrates. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 165–174, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100012>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjpp/a/38pdpT9SJjNYhhPGvh93ryt/?lang=en>. Acesso em: 25 jan. 2024.

REZENDE-TEIXEIRA, P.; DUSI, R. G.; JIMENEZ, P. C.; ESPINDOLA, L. S.; COSTA-LOTUFO, L. V. What can we learn from commercial insecticides? Efficacy, toxicity, environmental impacts, and future developments. **Environmental Pollution**, v. 300, p. 118983, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118983>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974912200197X>. Acesso em: 25 jan. 2024.

ROCCHETTI, G.; BRACESCHI, G. P.; ODELLO, L.; BERTUZZI, T., TREVISAN, M.; LUCINI, L. Identification of markers of sensory quality in ground coffee: An untargeted metabolomics approach. **Metabolomics**, v. 16, p. 1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11306-020-01751-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11306-020-01751-6>. Acesso em: 25 jan. 2024.

ROSTI, J.; BARTON, C. J.; ALBRECHT, S.; DUPREE, P.; PAULY, M.; FINDLAY, K.; ROBERTS, K.; SEIFERT, G. J. UDP-glucose 4-epimerase isoforms UGE2 and UGE4 cooperate in providing UDP-galactose for cell wall biosynthesis and growth of *Arabidopsis thaliana*. **The Plant Cell**, 19, 1565-1579, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.106.049619>. Disponível em: <https://academic.oup.com/plcell/article/19/5/1565/6091861?login=false>. Acesso em: 25 jan. 2024.

RUAN, Y.-L. Sucrose metabolism: gateway to diverse carbon use and sugar signaling. **Annual review of plant biology**, v. 65, p. 33-67, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040251>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-arplant-050213-040251>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SAMI, F.; YUSUF, M.; FAIZAN, M.; FARAZ, A.; HAYAT, S. Role of sugars under abiotic stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 109, p. 54-61 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.09.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942816303552>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SARAIVA, C. E. D. A. B.; FERNANDES, A. M.; LIMA, A. P. A.; COSTA, L. T. D.; CUNHA, C. N. Competitividade da cafeicultura brasileira. **Revista Política Agrícola**, v. 27, p. 9–16, 2018. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/13638>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SAUD, S.; SALAMATULLAH, A. M. Relationship between the chemical composition and the biological functions of coffee. **Molecules**, v. 26, p. 7634, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26247634>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/24/7634>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SHAHID, M.; KHAN, M. S.; AHMED, B.; SYED, A.; BAHKALI, A. H. Physiological disruption, structural deformation and low grain yield induced by neonicotinoid insecticides

in chickpea: A long term phytotoxicity investigation. **Chemosphere**, v. 262, p. 128388, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128388>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520325832>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SHAKIR, S. K.; KANWAL, M.; MURAD, W.; REHMAN, Z.; REHMAN, S.; DAUD, M. K.; AZIZULLAH, A. Effect of some commonly used pesticides on seed germination, biomass production and photosynthetic pigments in tomato (*Lycopersicon esculentum*). **Ecotoxicology**, v. 25, p. 329-341, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-015-1591-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10646-015-1591-9>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SHI, W.; ZHANG, Q.; SHENG, Y.; DONG, Z.; FENG, T.; ZHANG, J.; YU, L.; XU, Z.; PANG, L.; CHEN, J.; CHEN, X.; HUANG, J. Neonicotinoid insecticide imidacloprid induces chemosensory deficits in a nontarget parasitoid wasp. **Science of The Total Environment**, v. 907, p. 168089, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168089>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723067165>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SKLIROS, D.; KALLONIATI, C.; KARALIAS, G.; SKARACIS, G. N.; RENNENBERG, H.; FLEMETAKIS, E. Global metabolomics analysis reveals distinctive tolerance mechanisms in different plant organs of lentil (*Lens culinaris*) upon salinity stress. **Plant and soil**, v. 429, p. 451-468, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3691-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-018-3691-9>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SPARKS, T. C.; CROSSTHWAITE, A. J.; NAUEN, R., BANBA, S.; CORDOVA, D.; EARLEY, F.; EBBINGHAUS-KINTSCHER, U.; FUJIOKA, S.; HIRAO A.; KARMON, D.; KENNEDY, R.; NAKAO, T.; POPHAM, H. J. R.; SALGADO, V.; WATSON, G. B.; WEDEL, B. J.; WESSELS, F. J. Insecticides, biologics and nematicides: Updates to IRAC's mode of action classification-a tool for resistance management. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 167, p. 104587, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104587>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-018-3691-9>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SZCZEPANIEC, A.; RAUPP, M. J.; PARKER, R. D.; KERNS, D.; EUBANKS, M. D. Neonicotinoid insecticides alter induced defenses and increase susceptibility to spider mites in distantly related crop plants. **PLoS one**, v. 8, p. e62620, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062620>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0062620>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SUN, W.; CHEN, Z.; HONG, J.; SHI, J. Promoting human nutrition and health through plant metabolomics: Current status and challenges. **Biology**, v. 10, p. 20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology10010020>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-7737/10/1/20>. Acesso em: 25 jan. 2024.

UMETSU, N.; SHIRAI, Y. Development of novel pesticides in the 21st century. **Journal of Pesticide Science**, v. 45, p. 54-74, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1584/jpestics.D20-201>.

Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jpestics/45/2/45_D20-201/_article/-char/ja/. Acesso em: 25 jan. 2024.

VEGA, F. E.; ZISKA, L. H.; SIMPKINS, A.; INFANTE, F.; DAVIS, A. P.; RIVERA, J. A.; BARNABY J. Y.; WOLF, J. Early growth phase and caffeine content response to recent and projected increases in atmospheric carbon dioxide in coffee (*Coffea arabica* and *C. canephora*). **Scientific Reports**, v. 10, p. 5875, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62818-x>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-62818-x>. Acesso em: 25 jan. 2024.

WANG, J.; YU, Y. C.; LI, Y.; CHEN, L. Q. Hexose transporter SWEET5 confers galactose sensitivity to Arabidopsis pollen germination via a galactokinase. **Plant physiology**, v. 189, p. 388-401, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac068>. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article/189/1/388/6533458?login=false>. Acesso em: 25 jan. 2024.

WEI, C.; YANG, H.; WANG, S.; ZHAO, J.; LIU, C.; GAO, L.; XIA, E.; LU, Y.; TAI, Y.; SHE, G.; SUN, J.; CAO, H.; TONG, W.; GAO, Q.; LI, Y.; DENG, W.; JIANG, X.; WANG, W.; CHEN, Q.; ZHANG, S.; LI, H.; WU, J.; WANG, P.; LI, P.; SHI, C.; ZHENG, F.; JIAN, J.; HUANG, B.; SHAN, D.; SHI, M.; FANG, C.; YUE, Y.; LI, F.; LI, D.; WEI, S.; HAN, B.; JIANG, C.; YIN, Y.; XIA, T.; ZHANG, Z.; BENNETZEN, J. L.; ZHAO, S.; WAN, X. Draft genome sequence of *Camellia sinensis* var. *sinensis* provides insights into the evolution of the tea genome and tea quality. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, p. E4151–E4158, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1719622115>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1719622115>. Acesso em: 25 jan. 2024.

WEI, F.; FURIHATA, K.; KODA, M.; HU, F.; KATO, R.; MIYAKAWA, T.; TANOKURA, M. ¹³C NMR-based metabolomics for the classification of green coffee beans according to variety and origin. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, p. 10118-10125, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf3033057>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf3033057>. Acesso em: 25 jan. 2024.

WINGLER, A.; HENRIQUES, R. Sugars and the speed of life—Metabolic signals that determine plant growth, development and death. **Physiologia Plantarum**, v. 174, p. e13656, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.13656>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ppl.13656>. Acesso em: 25 jan. 2024.

WURTZEL, E. T.; KUTCHAN, T. M. Plant metabolism, the diverse chemistry set of the future. **Science**, v. 353, p. 1232-1236, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aad206>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aad206>. Acesso em: jan. 2024.

YAMADA, K.; KANAI, M.; OSAKABE, Y.; OHIRAKI, H.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Monosaccharide absorption activity of Arabidopsis roots depends on expression profiles of transporter genes under high salinity conditions. **Journal of Biological Chemistry**, v. 286, p. 43577-43586, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1074/jbc.M111.269712>. Disponível em: [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(20\)87072-0/fulltext](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(20)87072-0/fulltext). Acesso em: jan. 2024.

YENGGOKPAM, P.; MAZUMDER, P. B. Phytotoxicity of malathion (PM) and tatafen (PTF) towards *Solanum melongena* L. cv. Longai: a case study. **Plant Physiology Reports**, v. 25, p. 149-156, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40502-019-00498-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40502-019-00498-0.25>. Acesso em: jan. 2024.

ZHANG, Y.; HUANG, L.; LIU, L.; CAO, X.; SUN, C.; LIN, X. Metabolic disturbance in lettuce (*Lactuca sativa*) plants triggered by imidacloprid and fenvalerate. **Science of The Total Environment**, v. 802, p. 149764, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149764>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721048397>. Acesso em: 25 jan. 2024.

ZHANG, Y.; FU, J.; ZHOU, Q.; LI, F.; SHEN, Y.; YE, Z.; TANG, D.; CHI, N.; LI, L.; MA, S.; INAYAT, A. M.; GUO, T.; ZHAO J.; LI, P. Metabolite profiling and transcriptome analysis revealed the conserved transcriptional regulation mechanism of caffeine biosynthesis in tea and coffee plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 70, p. 3239-3251, 2022b. DOI: <https://doi-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/10.1021/acs.jafc.1c06886>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.1c06886>. Acesso em: 25 jan. 2024.

ZHOU, M. Z.; YAN, C.Y.; ZENG, Z.; LUO, L.; ZENG, W.; HUANG, Y.H. N- N-methyltransferases of caffeine biosynthetic pathway in plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, p. 15359-15372, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c06167>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.0c06167>. Acesso em: 25 jan. 2024.