

ÓLEO ESSENCIAL DE *MELALEUCA ALTERNIFOLIA* COMO ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL PARA O CONTROLE DE *TUTA ABSOLUTA* EM TOMATE

Estêvão Augusto Lomberti Melhorança - Universidade Estadual de Maringá (UEM) - estevaomelhoranca@gmail.com

Zilda Cristiani Gazim - Paranaense University (UNIPAR) - cristianigazim@prof.unipar.br

Priscila Fernandes Gomes Vargas - Universidade Estadual de Maringá (UEM) - ra131930@uem.br

Júlio César Guerreiro - Universidade Estadual de Maringá (UEM) - jcguerreiro@uem.br

Felippe Martins Damaceno - Universidade Estadual de Maringá (UEM), Campus Regional de Umuarama, Departamento de Meio Ambiente (DAM) - fmdamaceno2@uem.br

Resumo: A produção de tomate é altamente afetada pela traça-do-tomateiro, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae), uma praga cujo manejo depende fortemente de aplicações repetidas de inseticidas sintéticos, contribuindo para a contaminação ambiental, o desenvolvimento de resistência e os riscos para organismos não-alvo. Nesse contexto, alternativas ambientalmente sustentáveis são urgentemente necessárias para reduzir a dependência química nos sistemas de proteção de cultivos. Este estudo avaliou o potencial inseticida e antialimentar do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* como uma alternativa botânica para o controle de *T. absoluta*. O óleo essencial foi extraído por hidrodestilação e caracterizado quimicamente por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM). Mudas de tomate foram tratadas com diferentes concentrações do óleo (0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10 mg mL⁻¹), e larvas de segundo instar de *T. absoluta* foram expostas em condições controladas de laboratório. A mortalidade larval e o consumo foliar foram avaliados após 72 horas. O óleo essencial reduziu significativamente o consumo foliar de forma dose-dependente, atingindo uma redução de até 53,57% na maior concentração testada. A mortalidade larval aumentou progressivamente com o aumento das concentrações, chegando a 75% a 10 mg mL⁻¹, com uma DL₅₀ estimada de 6,62 mg mL⁻¹. Esses resultados destacam o potencial do óleo essencial de *M. alternifolia* como um inseticida botânico biodegradável e ambientalmente sustentável para o manejo integrado de pragas, contribuindo para a redução da dependência de pesticidas sintéticos e promovendo sistemas de produção de tomate mais sustentáveis.

Palavras-chave: Manejo integrado de pragas, Agricultura sustentável, *Melaleuca*.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

MELALEUCA ALTERNIFOLIA ESSENTIAL OIL AS AN ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE ALTERNATIVE FOR THE CONTROL OF TUTA ABSOLUTA IN TOMATO

Abstract: Tomato production is highly affected by the tomato leafminer, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae), an important pest whose management heavily depends on repeated applications of synthetic insecticides, contributing to environmental contamination, the development of resistance, and risks to non-target organisms. In this context, environmentally sustainable alternatives are urgently needed to reduce chemical dependence in crop protection systems. This study evaluated the insecticidal and antifeedant potential of *Melaleuca alternifolia* essential oil as a botanical alternative for the control of *T. absoluta*. The essential oil was extracted by hydrodistillation and chemically characterized by gas chromatography coupled to mass spectrometry (GC-MS). Tomato seedlings were treated with different concentrations of the oil (0, 2.5, 5.0, 7.5, and 10 mg mL⁻¹), and second-instar larvae of *T. absoluta* were exposed under controlled laboratory conditions. Larval mortality and leaf consumption were evaluated after 72 hours. The essential oil significantly reduced leaf consumption in a dose-dependent manner, reaching a reduction of up to 53.57% at the highest concentration tested. Larval mortality progressively increased with increasing concentrations, reaching 75% at 10 mg mL⁻¹, with an estimated LD₅₀ of 6.62 mg mL⁻¹. These results highlight the potential of *M. alternifolia* essential oil as a biodegradable and environmentally sustainable botanical insecticide for integrated pest management, contributing to the reduction of dependence on synthetic pesticides and promoting more sustainable tomato production systems.

Keywords: Integrated pest management, Sustainable agriculture, *Melaleuca*.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação dos sistemas de produção agrícola tem sido acompanhada por um aumento substancial no uso de pesticidas sintéticos para minimizar as perdas de colheitas causadas por pragas de insetos. Embora esses compostos tenham contribuído significativamente para melhorar a produtividade das culturas e a segurança alimentar, seu uso intensivo e recorrente tem gerado crescentes preocupações ambientais. Vários estudos demonstraram que os pesticidas convencionais podem contaminar o solo, os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, afetar organismos não-alvo, comprometer os serviços ecossistêmicos, acelerar a perda de biodiversidade e contribuir para riscos toxicológicos à saúde humana (DEVI *et al.*, 2022; ZIMMERMANN *et al.*, 2021). Além disso, o uso prolongado de inseticidas químicos intensificou a pressão seletiva sobre as populações de pragas, acelerando o desenvolvimento de resistência e reduzindo a eficácia a longo prazo dos programas de proteção de cultivos (GRANT *et al.*, 2019; MANSOUR; BIONDI, 2021). Nesse contexto, alternativas

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

sustentáveis capazes de reduzir a dependência química, mantendo a eficiência do controle de pragas, tornaram-se cada vez mais relevantes nos sistemas de produção agrícola.

Entre as pragas economicamente mais importantes que afetam as culturas de tomate em todo o mundo, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae), comumente conhecida como minadora-das-folhas-do-tomateiro, representa um dos principais desafios fitossanitários para a produção de tomate. Nativa da América do Sul, a praga se expandiu rapidamente pela Europa, África, Ásia e Oriente Médio, tornando-se uma das pragas invasoras mais destrutivas nos sistemas de cultivo de tomate (GIORGINI *et al.*, 2019; MANSOUR; BIONDI, 2021). As larvas se alimentam internamente de folhas, caules, flores e frutos, causando graves danos fisiológicos e produtivos, incluindo reduções na atividade fotossintética, lesões necróticas, depreciação dos frutos e perdas significativas de rendimento que podem exceder 80% em infestações não controladas (BOTTEGA *et al.*, 2018; GIORGINI *et al.*, 2019).

O manejo de *T. absoluta* tem historicamente se baseado em aplicações repetidas de inseticidas sintéticos, particularmente piretróides, diamidas, organofosforados, avermectinas e espinosinas (GRANT *et al.*, 2019). No entanto, a alta taxa reprodutiva da praga, o comportamento alimentar críptico, o ciclo de vida curto e a elevada capacidade adaptativa contribuíram para o surgimento de populações resistentes em diversas regiões produtoras de tomate em todo o mundo (GRANT *et al.*, 2019). Esse fenômeno não apenas compromete a eficácia do controle da praga, mas também intensifica a frequência de aplicação de pesticidas, aumentando os riscos de contaminação ambiental e os custos econômicos associados à produção de tomate (MANSOUR; BIONDI, 2021). Portanto, a incorporação de tecnologias ambientalmente compatíveis em programas de manejo integrado de pragas (MIP) tornou-se essencial para reduzir os impactos ecológicos, garantindo, ao mesmo tempo, a supressão eficaz da praga.

Nos últimos anos, os óleos essenciais derivados de plantas têm atraído crescente atenção científica como alternativas ecologicamente corretas aos inseticidas convencionais. Devido à sua biodegradabilidade, persistência ambiental relativamente baixa, potencial de bioacumulação reduzido e múltiplos modos de ação, os óleos essenciais são cada vez mais considerados ferramentas promissoras para o manejo sustentável de pragas (DHIFI *et al.*, 2016; SHARIFI-RAD *et al.*, 2017; SINGH *et al.*, 2021). Esses compostos consistem em misturas complexas de metabólitos secundários voláteis, principalmente monoterpenos, sesquiterpenos e fenilpropanoides, que podem exercer efeitos inseticidas, repelentes, fumigantes, antialimentares e de dissuasão da oviposição (AYLLÓN-GUTIÉRREZ *et al.*, 2024). Além disso, a natureza lipofílica e o baixo peso molecular de seus constituintes facilitam a penetração através da cutícula e do sistema respiratório dos insetos, aumentando sua atividade biológica contra pragas de insetos (DHIFI *et al.*, 2016).

Evidências recentes sugerem que os óleos essenciais podem contribuir substancialmente para a redução da dependência de pesticidas em sistemas agrícolas, proporcionando um controle eficiente de pragas com impactos ambientais potencialmente menores do que os compostos sintéticos (FOUAD *et al.*, 2023; AYLLÓN-GUTIÉRREZ *et al.*, 2024). Os óleos essenciais demonstraram atividade promissora contra pragas de insetos economicamente importantes por meio de diferentes mecanismos, incluindo a disrupção do sistema nervoso, o desequilíbrio oxidativo, a interferência na fisiologia digestiva e a inibição das vias de desintoxicação metabólica (ESSOUNG *et al.*, 2020; ZIMMERMANN *et al.*, 2021). Além disso, vários estudos indicam que os óleos essenciais podem

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

interferir no comportamento alimentar de insetos fitófagos, reduzindo os danos foliares e suprimindo o crescimento populacional por meio da atividade antialimentar (LIAO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2023).

A atividade inseticida do óleo essencial de *M. alternifolia* tem sido associada à interferência em vias fisiológicas e bioquímicas essenciais de insetos, particularmente a inibição da acetilcolinesterase (AChE), uma enzima crítica envolvida na neurotransmissão (MIYAZAWA; YAMAFUJI, 2006; MILLS *et al.*, 2004). A acetilcolinesterase regula a hidrólise da acetilcolina nas fendas sinápticas, e sua inibição pode resultar em acúmulo de neurotransmissores, hiperexcitação, paralisia muscular, comprometimento comportamental e, em última instância, morte do inseto (GUO *et al.*, 2007). Esse alvo bioquímico é particularmente relevante porque diversos inseticidas sintéticos atualmente utilizados contra *T. absoluta* também atuam no sistema nervoso, mas frequentemente apresentam maior persistência ambiental e riscos de toxicidade para organismos não-alvo (DEVI *et al.*, 2022). Portanto, a identificação de compostos naturais capazes de afetar vias bioquímicas semelhantes com impactos ambientais potencialmente reduzidos representa um avanço importante em direção a estratégias sustentáveis de manejo de pragas.

Apesar das crescentes evidências sobre as propriedades inseticidas do óleo essencial de *M. alternifolia*, ainda há poucas informações disponíveis sobre sua eficácia contra *T. absoluta*, particularmente em relação à sua atividade antialimentar e aos potenciais mecanismos bioquímicos sob uma perspectiva de sustentabilidade ambiental, visando reduzir a dependência de inseticidas sintéticos em sistemas de produção de tomate. Assim, este estudo avaliou os efeitos inseticidas e antialimentares do óleo essencial de *M. alternifolia* em larvas de *T. absoluta*, com o objetivo de avaliar sua aplicabilidade como uma alternativa ambientalmente sustentável para o manejo integrado de pragas no cultivo de tomate.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta e criação de insetos em laboratório

Larvas e adultos de *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) foram coletados em áreas de cultivo comercial de tomate no município de Umuarama, Paraná, Brasil (23°47'00" S, 53°22'39" O). Os espécimes coletados foram transportados para o Laboratório de Entomologia Agrícola da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Campus Regional de Umuarama, Paraná, Brasil (23°47'25" S, 53°15'31" O; altitude de 412 m), onde foi estabelecida uma colônia de laboratório.

Os insetos foram mantidos sob condições ambientais controladas em câmara climática a 25 ± 2 °C, umidade relativa de $75 \pm 5\%$ e fotoperíodo de 12 h. As larvas foram alimentadas ad libitum com folhas frescas de tomate (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae), que foram substituídas periodicamente para garantir qualidade nutricional adequada e manutenção da colônia. Apenas larvas saudáveis de segundo instar, de tamanho e condição fisiológica semelhantes, foram selecionadas para os bioensaios, a fim de minimizar a variabilidade experimental.

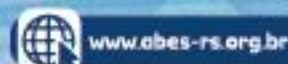
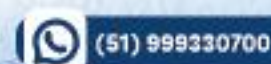
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



2.2. Extração e caracterização química do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia*

Material vegetal aéreo fresco de *Melaleuca alternifolia* (Maiden & Betche) Cheel (Myrtaceae) foi obtido do Jardim de Plantas Medicinais da Universidade Estadual de Maringá, Campus Regional de Umuarama, Paraná, Brasil. Os brotos da planta foram secos em condições controladas e, posteriormente, submetidos à hidrodestilação por 4,5 h utilizando um aparelho tipo Clevenger, seguindo a metodologia proposta por Wahba (2020), com pequenas adaptações.

Após a extração, o óleo essencial foi separado da fase aquosa, armazenado em recipientes de vidro âmbar e mantido sob refrigeração (4 °C) até o uso para minimizar a oxidação e a volatilização de compostos bioativos.

A caracterização química do óleo essencial foi realizada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (GC-MS), de acordo com a metodologia descrita por Daniel et al. (2020). A identificação dos compostos foi baseada na comparação dos espectros de massa com aqueles disponíveis na biblioteca espectral de GC-MS e na comparação dos índices de retenção linear (LRI) calculados, obtidos usando uma série homóloga de n-alcenos (C7–C26), com dados da literatura relatados por Adams (2007). A composição do óleo essencial foi ainda comparada com os padrões de qualidade estabelecidos pela ISO 4730 (2017) para o óleo essencial de *M. alternifolia*.

2.3. Delineamento experimental, bioensaios inseticidas e avaliação antialimentar

As atividades inseticida e antialimentar do óleo essencial de *M. alternifolia* foram avaliadas em condições de laboratório utilizando cinco concentrações: 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0 mg mL⁻¹. Água destilada contendo polissorbato (0,01%) foi utilizada como agente emulsificante para facilitar a dispersão do óleo. O tratamento controle consistiu exclusivamente de água destilada com emulsificante, sem adição de óleo essencial.

Plântulas de tomate da cultivar híbrida Saladette (F1) Monza® Topseed, contendo duas folhas totalmente expandidas, foram imersas individualmente por 15 s em 20 mL de cada solução de tratamento e, posteriormente, secas ao ar em temperatura ambiente.

O experimento seguiu um delineamento inteiramente casualizado com dez repetições por tratamento. Cada unidade experimental consistia em um recipiente de plástico tipo Gerbox (11 × 11 × 3,5 cm) contendo duas mudas de tomate tratadas e duas larvas de segundo instar de *T. absoluta*. Os recipientes foram adaptados com tampas perfuradas cobertas com tecido de voile para garantir a troca gasosa e, ao mesmo tempo, impedir a fuga dos insetos.

A mortalidade larval e o consumo de folhas foram avaliados durante um período de exposição de 72 horas. A mortalidade foi determinada pela contagem de larvas mortas ao final do período experimental, considerando-se como mortas as larvas que não respondiam à estimulação mecânica.

O efeito antialimentar foi avaliado pela medição do consumo de massa de folhas frescas. Os pesos inicial e final das folhas foram registrados utilizando uma balança analítica de precisão, e o consumo de folhas foi calculado com base na diferença entre a biomassa fresca inicial e final. Para corrigir a perda natural de água durante o período experimental, um controle adicional de umidade foi estabelecido utilizando folhas de tomate submetidas às mesmas condições experimentais, mas sem

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

exposição aos insetos. A perda de massa relacionada à umidade foi posteriormente descontada das estimativas finais de consumo.

2.4. Análise estatística

Os dados de mortalidade larval e consumo foliar foram inicialmente submetidos a uma análise exploratória para verificar a normalidade e a homogeneidade das variâncias. Posteriormente, os efeitos das concentrações do óleo essencial sobre a mortalidade larval e o consumo foliar foram analisados por análise de variância (ANOVA) utilizando o teste F com nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Quando efeitos significativos do tratamento foram detectados, análises de regressão foram realizadas para investigar as relações dose-resposta entre a concentração do óleo essencial e as variáveis biológicas avaliadas. Os modelos matemáticos com melhor ajuste foram selecionados com base na significância estatística e no coeficiente de determinação (R^2). A dose letal mediana (DL_{50}) e a dose letal necessária para causar 90% de mortalidade (DL_{90}), juntamente com seus respectivos intervalos de confiança e erros padrão, foram estimadas a partir de dados de mortalidade usando análise de dose-resposta.

Todas as análises estatísticas foram conduzidas utilizando o ambiente estatístico R (R Core Team, 2016), implementado no software RStudio (RSTUDIO TEAM, 2015).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição química do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia*

A caracterização química do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* revelou a presença de monoterpenos e sesquiterpenos como constituintes predominantes (Tabela 1). O perfil cromatográfico obtido neste estudo está de acordo com os padrões de composição estabelecidos pela ISO 4730 (2017) para óleo essencial de melaleuca e corrobora relatos anteriores que descrevem o terpinen-4-ol como o principal constituinte bioativo do óleo de *M. alternifolia* (BARBOSA *et al.*, 2013; BOROTOVÁ *et al.*, 2022).

Tabela 1 – Caracterização química do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia*.

Composto	Percentual (%)
Terpinen-4-ol	44,85
γ -terpineno	20,86
α -4-careno	11,99
γ -elemeno	5,16
α -terpineol	4,60

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

A predominância do terpinen-4-ol é particularmente relevante porque este monoterpene tem sido associado a múltiplas atividades biológicas, incluindo efeitos inseticidas, antimicrobianos e neurotóxicos contra artrópodes (LIAO *et al.*, 2017; RAMACHANDRAN *et al.*, 2023). Além disso, o γ -terpineno e o α -terpineol podem contribuir sinergicamente para a atividade biológica do óleo, aumentando a toxicidade e a perturbação comportamental em insetos por meio de interações aditivas ou sinérgicas entre os constituintes (JANKOWSKA *et al.*, 2018).

A complexidade da composição do óleo essencial representa uma importante vantagem no manejo sustentável de pragas, pois misturas contendo múltiplos compostos bioativos tendem a reduzir a probabilidade de desenvolvimento rápido de resistência em comparação com inseticidas sintéticos baseados em ingredientes ativos únicos (ISMAN, 2020; CAMPOLO *et al.*, 2023). Além disso, a alta volatilidade e biodegradabilidade dos óleos ricos em terpenos podem contribuir para uma menor persistência ambiental e menor acumulação em ecossistemas agrícolas, características consideradas desejáveis para tecnologias de proteção de culturas ambientalmente compatíveis (AYLLÓN-GUTIÉRREZ *et al.*, 2024).

3.2 Atividade antialimentar em larvas de *Tuta absoluta*

A aplicação do óleo essencial de *M. alternifolia* reduziu significativamente o consumo foliar por larvas de *T. absoluta* após 72 h de exposição ($p < 0,05$), demonstrando atividade antialimentar dependente da concentração (Figura 1). O tratamento controle apresentou o maior consumo foliar médio, enquanto o aumento das concentrações do óleo essencial reduziu progressivamente a atividade alimentar. Na maior concentração avaliada ($10,0 \text{ mg mL}^{-1}$), o consumo foliar foi reduzido em aproximadamente 53,57% em comparação com o controle não tratado. A análise de regressão demonstrou uma relação negativa entre a concentração do óleo essencial e o consumo foliar, indicando que o aumento das concentrações intensificou a dissuasão alimentar.

Figura 1. Consumo médio de folhas de tomateiros por *T. absoluta* Meyrick durante um período de 72 horas após o tratamento com óleo essencial de *M. alternifolia*. ** (valor de $p < 0,05$).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



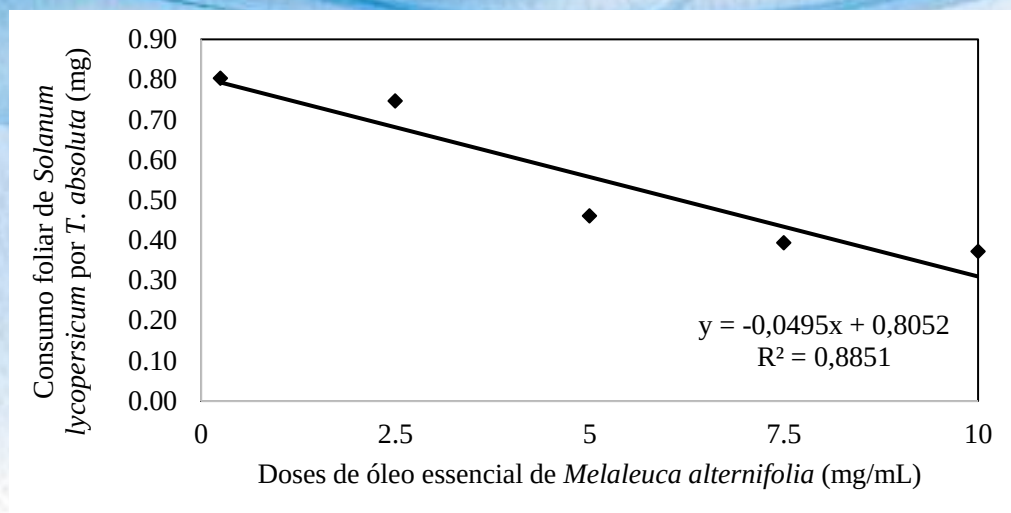
(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br



A atividade antialimentar observada neste estudo corrobora investigações anteriores que relatam a perturbação comportamental causada por óleos essenciais contra pragas lepidópteras. Liao *et al.* (2017) demonstraram que o óleo essencial de *M. alternifolia* reduziu significativamente a atividade alimentar em larvas de *Helicoverpa armigera*, enquanto Silva *et al.* (2023) relataram reduções expressivas no consumo foliar por *Ascia monuste orseis* após exposição ao óleo da árvore do chá. De acordo com esses autores, monoterpenos como o terpinen-4-ol podem interferir nos receptores gustativos e nas vias de estimulação alimentar, reduzindo a ingestão de alimentos e prejudicando o desenvolvimento larval.

A supressão do comportamento alimentar representa uma importante vantagem ecológica e agrônômica, pois a redução dos danos à cultura pode ocorrer mesmo em situações em que a mortalidade total dos insetos não é alcançada. No caso de *T. absoluta*, cujas larvas se alimentam internamente nos tecidos foliares, a redução da intensidade alimentar pode diminuir substancialmente o comprometimento fotossintético e as perdas econômicas em sistemas de produção de tomate.

Do ponto de vista do manejo ambiental, o efeito antialimentar de compostos botânicos pode contribuir para a redução da frequência de aplicações de inseticidas no cultivo de tomate. Esse aspecto é particularmente relevante considerando que o manejo convencional de *T. absoluta* frequentemente envolve aplicações químicas repetidas ao longo do ciclo da cultura, aumentando substancialmente os riscos de contaminação ambiental e a pressão de seleção para populações resistentes (GRANT *et al.*, 2019; MANSOUR; BIONDI, 2021). Estudos indicam que o Terpinen-4-ol interfere diretamente com enzimas metabólicas essenciais em insetos, como fosfatases, glutatona S-transferases, citocromo P-450 e polifenol oxidases, que estão envolvidas na biotransformação e desintoxicação de compostos nocivos (LIN *et al.*, 2022). A inibição dessas enzimas pode aumentar a suscetibilidade dos insetos a compostos bioativos, contribuindo para os efeitos antialimentares e letais observados.

Ademais, a redução na alimentação, também descrita por Abdullah *et al.* (2015) e Ribeiro *et al.* (2015), representa um impacto direto na sobrevivência e capacidade reprodutiva da praga,

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

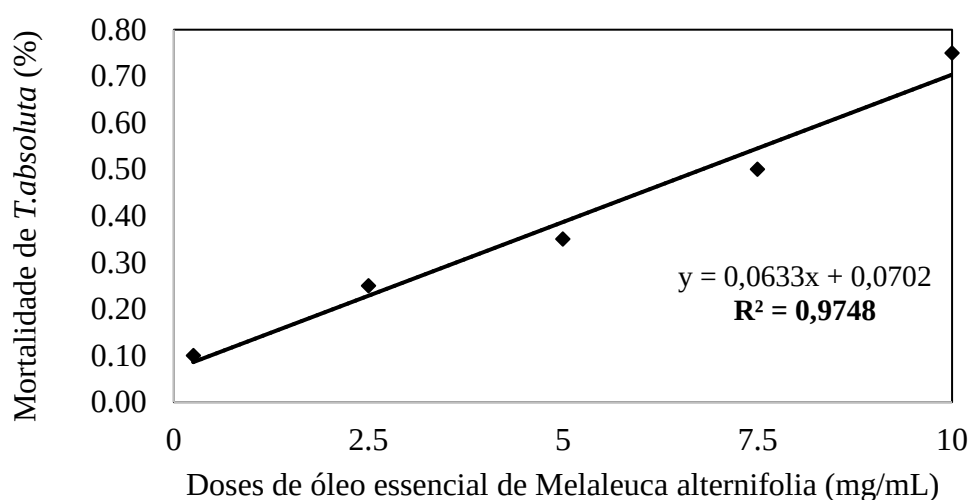
tornando-se uma abordagem promissora para o manejo integrado de *T. absoluta*. A capacidade de repelir a alimentação da praga reduz os danos às plantas hospedeiras, minimizando as perdas econômicas e a dependência de inseticidas químicos sintéticos. Portanto, os resultados deste estudo destacam a relevância do óleo essencial de *M. alternifolia* como uma alternativa viável e sustentável para o manejo integrado de pragas, particularmente para *T. absoluta*. Explorar o potencial antialimentar e inseticida deste composto, especialmente o Terpinen-4-ol, pode contribuir significativamente para estratégias de controle baseadas em princípios ecológicos e com menor impacto ambiental.

Embora o presente estudo tenha demonstrado uma atividade antialimentar promissora em condições de laboratório, investigações adicionais em condições de estufa e de campo são necessárias para avaliar a persistência, a estabilidade e a eficácia prática do óleo essencial de *M. alternifolia* sob condições de exposição ambiental, como radiação ultravioleta, volatilização e chuva.

3.3 Atividade inseticida e estimativa da dose letal

O modelo matemático que melhor representa a mortalidade de *T. absoluta* quando se utiliza o óleo essencial de *M. alternifolia* é linear. Ao avaliar a mortalidade larval exposta ao óleo, observa-se um aumento progressivo na mortalidade, com valores subindo de 10%, 25%, 40%, 50% para 75% à medida que as seguintes concentrações foram aplicadas: 0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10 mg/mL. Na concentração de 7,5 mg/mL, houve aproximadamente 50% de mortalidade, o que é 40% maior do que o valor observado no controle, atingindo uma mortalidade máxima de 75% na concentração de 10 mg/mL, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Mortalidade de *Tuta absoluta* Meyrick em 72 horas após tratamentos com óleo essencial de *M. alternifolia*. ** (valor de $p < 0,05$).



Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



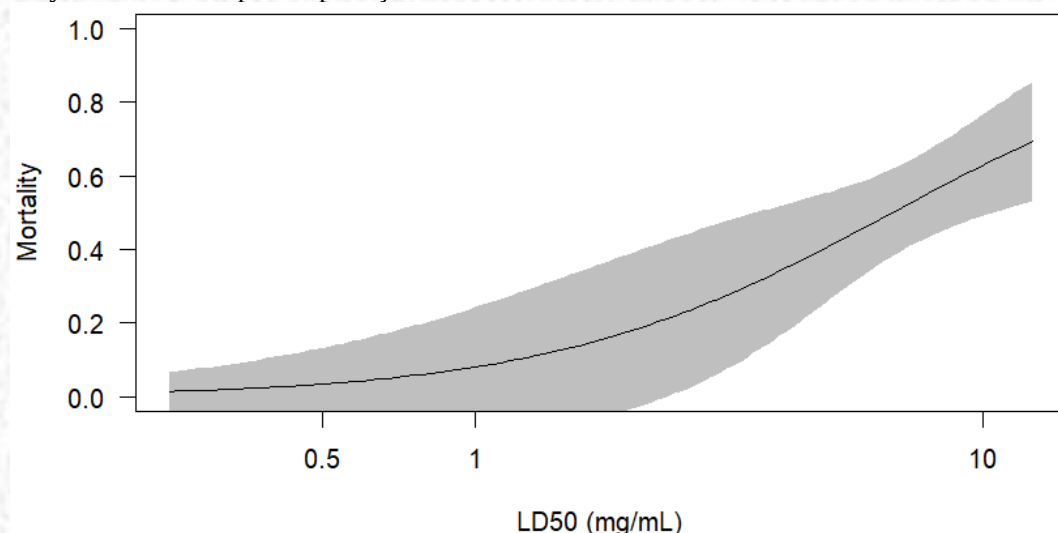
www.abes-rs.org.br

Além disso, os resultados apresentados reforçam a eficácia do óleo essencial de *M. alternifolia* como uma ferramenta promissora para o manejo de *T. absoluta*, demonstrando não apenas sua capacidade de repelir, mas também seu potencial inseticida. A relação positiva e linear entre as doses aplicadas e a mortalidade das pragas (descrita pela equação $y = 6,3322x + 7,0223$; $R^2 = 0,9748$) indica que o aumento das concentrações do óleo promove uma resposta consistente e previsível na eliminação de insetos. O alto coeficiente de determinação confirma a eficácia do produto.

A dose letal mediana estimada (DL_{50}) foi de 6,6158 mg/mL (com um erro padrão de 1,1760), com um intervalo de confiança de 95% variando de 4,1770 mg/mL a 9,0546 mg/mL. Esses dados indicam que mesmo concentrações moderadas do óleo essencial são suficientes para causar um aumento significativo na mortalidade das pragas, o que é vantajoso para aplicações práticas. Isso permite o uso de volumes menores do produto, reduzindo custos e minimizando os impactos ambientais (Figura 3).

Para atingir a maior taxa de mortalidade (DL_{90}), a estimativa foi de 36,651 mg/mL, embora com maior incerteza, refletida no amplo intervalo de confiança (-15,482 a 88,783 mg/mL) e no alto desvio padrão (25,138). Esses resultados destacam a necessidade de mais estudos para refinar os valores em concentrações mais altas. As enzimas desempenham um papel crucial na desintoxicação de xenobióticos e na proteção das células contra compostos nocivos. A inibição dessas enzimas compromete a capacidade dos insetos de metabolizar substâncias tóxicas, aumentando sua suscetibilidade ao óleo essencial. As altas taxas de mortalidade observadas na dose de 10 mg/mL (acima de 70%) demonstram o potencial do óleo essencial para o controle de populações de *T. absoluta* no campo. Além disso, a curva dose-resposta, que mostra aumento da mortalidade mesmo em concentrações acima de 1 mg/mL, reflete a eficácia do óleo essencial em concentrações viáveis para aplicação em larga escala.

Figura 3. Dose letal mediana estimada (DL_{50}) do óleo de *M. alternifolia* em larvas de *T. absoluta* Meyrick 72 horas após a aplicação do tratamento.



Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Essa característica é particularmente importante em sistemas de manejo integrado de pragas (MIP), onde a redução do uso de inseticidas sintéticos é uma prioridade. O uso de óleos essenciais, como o de *M. alternifolia*, oferece vantagens ambientais significativas. Ao contrário de muitos inseticidas químicos convencionais, esses produtos são biodegradáveis, apresentam menor risco de bioacumulação e, geralmente, têm menor toxicidade para organismos não-alvo. A integração desses produtos em programas de MIP pode contribuir para práticas agrícolas mais sustentáveis, reduzindo os impactos ambientais e promovendo a segurança alimentar.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos e no objetivo do presente estudo, conclui-se que o óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* apresenta forte potencial inseticida no controle de *Tuta absoluta*, demonstrando um efeito dose-dependente tanto na mortalidade larval quanto na redução do consumo foliar. As concentrações testadas (0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10 mg/mL) demonstraram um aumento progressivo na mortalidade da praga, com mortalidade máxima de 75% observada na concentração de 10 mg/mL, enquanto concentrações mais baixas também apresentaram eficácia significativa, evidenciando o efeito repelente do óleo. A análise dos dados reforça a ação inseticida do composto, com ênfase no Terpinen-4-ol, principal constituinte do óleo, que interfere diretamente nas enzimas metabólicas do inseto, contribuindo para a redução do consumo alimentar e o aumento da mortalidade. Esses achados indicam que o óleo essencial de *M. alternifolia* pode ser uma alternativa viável e sustentável para o manejo integrado de pragas, como no caso de *T. absoluta*, oferecendo uma solução ambientalmente amigável para substituir os inseticidas químicos convencionais. A utilização do óleo essencial, em concentrações adequadas para o campo, pode contribuir para a redução dos danos causados por pragas e para a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS

Abdullah, F., Subramanian, P., Ibrahim, H., Malek, S. N. A., Lee, G. S., & Hong, S. L. (2015). Chemical composition, antifeedant, repellent, and toxicity activities of the rhizomes of galangal, *Alpinia galanga* against Asian subterranean termites, *Coptotermes gestroi* and *Coptotermes curvignathus* (Isoptera: Rhinotermitidae). *Journal of Insect Science*, 15(1), 7.

<https://doi.org/10.1093/jisesa/ieu175>

Adams, R. P. (2007). Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectrometry (4th ed.).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

AYLLÓN-GUTIÉRREZ, R.; DÍAZ-RUBIO, L.; MONTAÑO-SOTO, M.; HARO-VÁZQUEZ, M. P.; CORDOVA-GUERRERO, I. Applications of plant essential oils in pest control and their encapsulation for controlled release: a review. *Agriculture*, Basel, v. 14, n. 10, p. 1766, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14101766>

BARBOSA, L. C. A.; SILVA, C. J.; TEIXEIRA, R. R.; MEIRA, R. M. S. A.; PINHEIRO, A. L. Chemistry and biological activities of essential oils from *Melaleuca* L. species. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, Zagreb, v. 78, n. 1, p. 11-23, 2013.

Bottega, D. B., Junior, A. L. B., Rodrigues, N. E. L., de Souza, B. H. S., Forim, M. R., & Santos, T. F. (2018). Atratividade, consumo e mortalidade de *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) em tomateiro tratado com óleo de *Melia azedarach*. *Revista de Ciências Agrárias*, 41(2), 454-463. <https://doi.org/10.19084/RCA17038>

Campolo, O., Cherif, A., Ricupero, M., Siscaro, G., Grissa-Lebdi, K., Russo, A., Cucci, L. M., Di Pietro, P., Satriano, C., Desneux, N., Biondi, A., Zappalà, L., & Palmeri, V. (2017). Citrus peel essential oil nanoformulations to control the tomato borer, *Tuta absoluta*: Chemical properties and biological activity. *Scientific Reports*, 7, 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13413-0>

Daniel, P. S., Lourenco, E. L. B., Cruz, R. M. S., Goncalves, C. H. S., Almas, L. R. M., Silva, C., Jacomassi, E., Brum Junior, L., & Alberton, O. (2020). Composition and antimicrobial activity of essential oil of yarrow (*Achillea millefolium* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 14, 545-550. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.03.p2325>

Devi, P. I., Manjula, M., & Bhavani, R. V. (2022). Agrochemicals, environment, and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 399-421. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120920-111015>

Dhifi, W., Bellili, S., Jazi, S., Bahloul, N., & Mnif, W. (2016). Essential oils chemical characterization and investigation of some biological activities: A critical review. *Medicines*, Estados Unidos da América, 3(4), 25-41. <https://doi.org/10.3390/medicines3040025>

Essoung, F. R. E., Tadjong, A. T., Chhabra, S. C., Mohamed, S. A., & Hassanali, A. (2020). Repellence and fumigant toxicity of essential oils of *Ocimum gratissimum* and *Ocimum kilimandscharicum* on *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1), 37963-37976. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09773-2>

FOUAD, H. A.; CÂMARA, C. A. G.; MORAES, M. M.; TAVARES, W. S.; LEGASPI, J. C.; ZANUNCIO, J. C. Insecticidal and repellent activities of four essential oils against *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Dose-Response*, Thousand Oaks, v. 21, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/15593258231210263>.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Giorgini, M., Guerrieri, E., Cascone, P., & Gontijo, L. (2019). Current strategies and future outlook for managing the Neotropical tomato pest *Tuta absoluta* (Meyrick) in the Mediterranean Basin. *Neotropical Entomology*, 48, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13744-018-0636-1>

Grant, C., Jacobson, R., Ilias, A., Berger, M., Vasakis, E., Bielza, P., & Bass, C. (2019). The evolution of multiple-insecticide resistance in UK populations of tomato leafminer, *Tuta absoluta*. *Pest Management Science*, 75(8), 2079-2085. <https://doi.org/10.1002/ps.5381>

Guo, J., Gao, J. F., & Tang, Z. H. (2007). Kinetic mechanism and application on acetylcholinesterase. *Pesticides*, 46(1), 18-21.

International Standard. (2017). Essential oil of *Melaleuca*, terpinen-4-ol type (Tea Tree oil) (ISO 4730:2017).

ISMAN, M. B. Botanical insecticides in the twenty-first century—fulfilling their promise? *Annual Review of Entomology*, Palo Alto, v. 65, p. 233-249, 2020.

JANKOWSKA, M.; ROGALSKA, J.; WYSZKOWSKA, J.; STANKIEWICZ, M. Molecular targets for components of essential oils in the insect nervous system: a review. *Molecules*, Basel, v. 23, n. 1, p. 34, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23010034>.

Liao, M., Xiao, J. J., Zhou, L. J., Yao, X., Tang, F., Hua, R. M., & Cao, H. Q. (2017). Chemical composition, insecticidal and biochemical effects of *Melaleuca alternifolia* essential oil on the *Helicoverpa armigera*. *Journal of Applied Entomology*, 141(9), 721-728. <https://doi.org/10.1111/jen.12397>

Liao, M., Xiao, J. J., Zhou, L. J., Yao, X., Tang, F., Hua, R. M., & Cao, H. Q. (2017). Chemical composition, insecticidal and biochemical effects of *Melaleuca alternifolia* essential oil on the *Helicoverpa armigera*. *Journal of Applied Entomology*, 141(9), 721-728. <https://doi.org/10.1111/jen.12397>

Lin, S., Wei, J., Yang, B., Zhang, M., & Zhuo, R. (2022). Bioremediation of organic pollutants by white rot fungal cytochrome P450: The role and mechanism of CYP450 in biodegradation. *Chemosphere*, 301, 134776. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134776>

Mansour, R., & Biondi, A. (2021). Releasing natural enemies and applying microbial and botanical pesticides for managing *Tuta absoluta* in the MENA region. *Phytoparasitica*, 49(1), 179-194. <https://doi.org/10.1007/s12600-020-00849-w>

Mills, C., Cleary, B. V., Walsh, J. J., & Gilmer, J. F. (2004). Inhibition of acetylcholinesterase by tea tree oil. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 56(3), 375-379. <https://doi.org/10.1211/0022357022773>

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Miyazawa, M., & Yamafuji, C. (2006). Inhibition of acetylcholinesterase activity by tea tree oil and constituent terpenoids. *Flavour and Fragrance Journal*, 21(2), 198-201. <https://doi.org/10.1002/ffj.1580>

R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>.

Ramachandran, M., Jayakumar, M., & Thirunavukkarasu, S. (2023). Insecticidal activity of *Melaleuca alternifolia* (Myrtaceae) essential oil against *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) and its inhibitory effects on insecticide resistance development. *The Canadian Entomologist*, 155(9), 32-45. <https://doi.org/10.4039/tce.2023.1>

Ribeiro, R. C., Zanuncio, T. V., Ramalho, F. D., Da Silva, C. A. D., Serrão, J. E., & Zanuncio, J. C. (2015). Feeding and oviposition of *Anticarsia gemmatilis* (Lepidoptera: Noctuidae) with sublethal concentrations of ten condiments essential oils. *Industrial Crops and Products*, 74(1), 139-143. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.057>

Sharifi-Rad, J., Sureda, A., Tenore, G. C., Daglia, M., Sharifi-Rad, M., Valussi, M., & Iriti, M. (2017). Biological activities of essential oils: From plant chemoeology to traditional healing systems. *Molecules*, 22(1) 70-125. <https://doi.org/10.3390/molecules22010070>

SILVA, P. H. M.; PRADO, E. P.; FERREIRA-FILHO, P. J.; FRANCISCO, J. P.; DEL QUIQUI, E. M.; SILVA, C.; GUERREIRO, J. C. Insecticidal and antifeedant bioactivities of *Melaleuca alternifolia* essential oil on *Ascia monuste orseis*. *Revista Colombiana de Entomología*, Bogotá, v. 49, n. 2, e12391, 2023. DOI: <https://doi.org/10.25100/socolen.v49i2.12391>

Singh, J., Singh, P., Vaishnav, A., Ray, S., Rajput, R. S., Singh, S. M., & Singh, H. B. (2021). Belowground fungal volatiles perception in okra (*Abelmoschus esculentus*) facilitates plant growth under biotic stress. *Microbiological Research*, 246, 126721. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126721>

Wahba, T. F. (2020). Antifeedant activity of three essential oils and their nanoemulsions against the rice weevil *Sitophilus oryzae* (L.). *Egyptian Scientific Journal of Pesticides*, 6(2), 19-31.

Zimmermann, R. C., de Carvalho Aragão, C. E., de Araújo, P. J. P., Benatto, A., Chaaban, A., Martins, C. E. N., & Zawadneak, M. A. (2021). Insecticide activity and toxicity of essential oils against two stored-product insects. *Crop Protection*, 144(1), 55-75. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105575>

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br