

Óleo essencial de *Piper aduncum* L.: toxicidade e sinergismo como estratégias de controle de *Sitophilus zeamais* Motschulsky, 1855 (Coleoptera: Curculionidae): uma revisão de literatura

Roger Ventura Oliveira¹, Adalberto Hipólito de Sousa², Gabriela da Silva Tamwing¹, Márcio Chaves da Silva¹, Márcia Chaves da Silva¹, Barbara Barbosa Mota¹

¹Discente da Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-graduação em Agronomia Produção Vegetal, Rio Branco, Acre, Brasil. ²Professor da Universidade Federal do Acre, Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Rio Branco, Acre, Brasil. *rventura@gmail.com

Recebido em: 29/05/2023

Aceito em: 09/10/2023

Publicado em: 30/12/2023

DOI: <https://doi.org/10.29327/269504.5.2-30>

RESUMO

O óleo essencial de *Piper aduncum* (OEPA) tem sido estudado como alternativa no controle do gorgulho (*Sitophilus zeamais*), praga que danifica grãos armazenados como o milho. Utilizou-se nesta revisão de literatura o banco de dados do Google Acadêmico como fonte de informação. A revisão foi baseada em artigos científicos, revisões e livros do tema, com as seguintes chaves descritoras: "Maize weevil", "Piper aduncum", "Essential oils", "Synergism" e "Stored products". A pesquisa foi limitada ao período de 2003 a 2023. Foram excluídos artigos fora do período delimitado, além de monografias, dissertações, teses, resumos e anais de congresso. Os resultados foram apresentados com base na contagem do número de banco de dados e acessos às revistas selecionadas. A revisão abrange análise detalhada de pesquisas que investigam eficácia do óleo essencial de *P. aduncum* no controle do gorgulho *S. zeamais*, bem como a utilização de sinergismo por meio da combinação desse óleo essencial com outros compostos para potencializar seus efeitos. Há evidências que o potencial de ampliar a ação do OEPA por meio do sinergismo com outros compostos. Essas descobertas fornecem base de conhecimento para desenvolver de estratégias de controle mais eficazes e sustentáveis contra *S. zeamais* e outras pragas de grãos armazenados. **Palavras-chave:** Gorgulho do milho. Pimenta de macaco. Dilapiol.

Essential oil of *Piper aduncum* L.: toxicity and synergism as strategies to control *Sitophilus zeamais* Motschulsky, 1855 (Coleoptera: Curculionidae): a review

ABSTRACT

The essential oil of *Piper aduncum* (EOPA) has been studied as an alternative to control the weevil (*Sitophilus zeamais*), a pest that damages stored grains such as corn. In this review, the Google Scholar database was used as a source of information. The review was based on scientific articles, reviews and books on the subject, with the following descriptors: "Maize weevil", "Piper aduncum", "Essential oils", "Synergism" and "Stored products". The search was limited to the period from 2003 to 2023. Articles outside the defined period were excluded, in addition to monographs, dissertations, theses, abstracts and conference proceedings. The results were presented based on counting the number of databases and accesses to selected journals. The review includes a detailed analysis of studies that investigate the effectiveness of *P. aduncum* essential oil in controlling the weevil *S. zeamais*, as well as the use of synergism through the combination of this essential oil with other compounds to enhance its effects. There

is evidence that the potential to enhance the action of EOPA through synergism with other compounds. These findings provide a knowledge base for developing more effective and sustainable control strategies against *S. zeamais* and other stored grain pests.

Keywords: Maize weevil. Spiked pepper. Dillapiole.

INTRODUÇÃO

Atender à demanda alimentar decorrente do crescimento populacional representa um desafio significativo, especialmente em países em desenvolvimento. Nessas regiões, os custos econômicos associados às perdas na fase de pós-colheita e armazenamento acarretam riscos consideráveis, especialmente quando essas atividades são conduzidas de maneira inadequada, resultando na infestação por insetos-pragas (LOPEZ-CASTILHO et al., 2018).

Dentre as pragas que causam infestações em grãos armazenados, destaca-se o gorgulho *Sitophilus zeamais* Motschulsky, 1855 (Coleoptera: Curculionidae) é uma das pragas mais severas em produtos armazenados, especialmente no milho, pois ataca os grãos intactos e sadios. Apresenta infestação cruzada, ou seja, tem a capacidade de infestar grãos tanto no campo quanto no armazenamento e possuir elevado potencial biótico. Além do milho, ele pode atacar outros cereais e alimentos processados (FARONI; SOUSA, 2006).

Práticas de pós-colheita para o controle de *S. zeamais* e outras pragas de grãos armazenados, incluindo estruturas de armazenamento hermético e proteção química por meio de inseticidas sintéticos, são estratégias eficazes para reduzir essas perdas. Contudo, é necessário ressaltar que pequenos e médios agricultores frequentemente enfrentam restrições financeiras que dificultam a adoção dessas práticas (FREITAS et al., 2016; MIDEGA et al., 2016). Além disso, o uso indiscriminado desses inseticidas tem causado efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, além do surgimento de resistência em populações de insetos (PATIÑO-BAYONA et al., 2021).

Dessa forma, diante da preocupação com a biodiversidade e a saúde humana, as pesquisas têm intensificado a exploração de certos compostos derivados de plantas, como os óleos essenciais (OEs), que têm sido propostos como alternativas sustentáveis (ACHIMÓN et al., 2022). Os OEs desempenham um papel importante na defesa contra patógenos e herbívoros, além de atrair polinizadores e disseminadores de sementes (PAVELA; BENELLI; 2016).

A grande diversidade de plantas existente no Brasil possui potencial comprovado como bioinseticida contra agentes bióticos, podendo substituir ou reduzir o uso de inseticidas sintéticos, especialmente na região Amazônica. Uma espécie em destaque é a *Piper aduncum* L., popularmente conhecida como pimenta-de-macaco pertencente à família das Piperáceas (BERGO et al., 2005; DUROFIL et al., 2021).

Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar uma abordagem sobre a utilização de óleos essenciais de *P. aduncum*, que podem ser uma alternativa viável como inseticida botânico no controle de *S. zeamais*, assim como de outras pragas de grãos armazenados.

METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, realizada em março de 2023. As informações foram obtidas a partir de uma busca no banco de dados do Google Acadêmico. A revisão foi baseada em artigos científicos, revisões e livros e/ou capítulos de livros relacionados ao tema. As seguintes palavras-chave foram utilizadas em inglês: ‘Maize weevil’; ‘Piper aduncum’; ‘Essential oils’; ‘Synergism’; ‘Stored products’, nessa ordem, para restringir a pesquisa. Além disso, foram pesquisadas as palavras-chave ‘Maize weevil’ e ‘Piper aduncum’ de forma isolada e combinada.

Os critérios de inclusão foram definidos no início da pesquisa, quando o tema em questão foi estabelecido. Foram incluídos na pesquisa estudos disponíveis na íntegra em inglês e português (quando disponíveis), desde que apresentassem pelo menos três palavras-chave. A pesquisa foi restrita ao período de 2003 a 2023, com o objetivo de concentrar os resultados sobre o tema em questão.

Determinou-se os seguintes critérios de exclusão: artigos que estavam fora do período delimitado e que não apresentavam relevância de acordo com as palavras-chave estabelecidas. Adicionalmente, foram excluídas monografias, dissertações e teses acadêmicas, bem como resumos e anais de congresso.

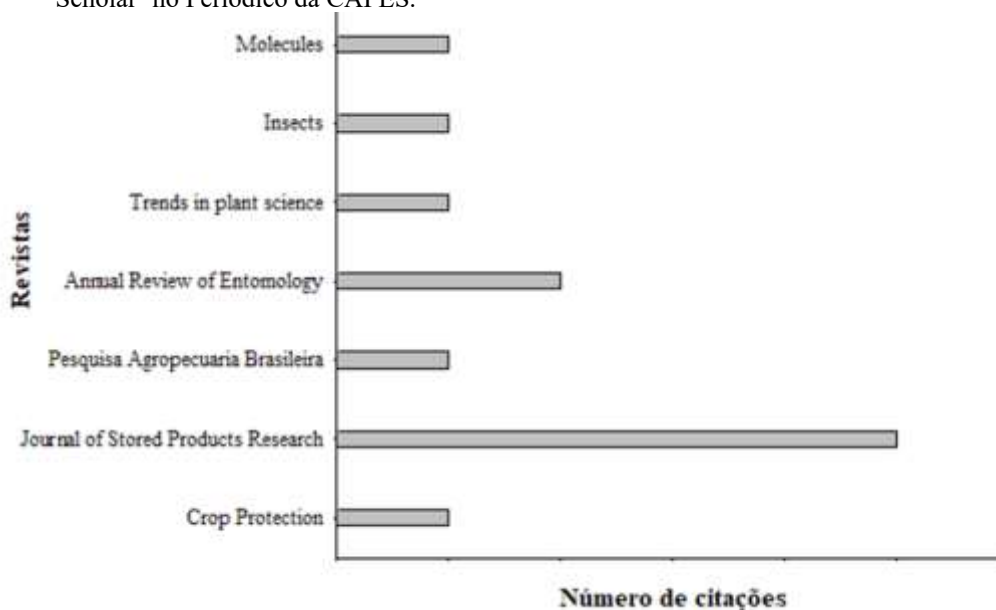
Para a elaboração do quadro, foram selecionadas as bases de dados e o número de resultados obtidos no Periódico CAPES. Para a criação do gráfico, foi feita a contagem do número de acessos às revistas selecionadas. Todas as informações atenderam aos critérios de inclusão dos últimos 20 anos, conforme as chaves descritoras. Para a coleta das informações, foram considerados artigos relacionados ao uso do óleo essencial de *Piper aduncum* (OEPA) no controle de pragas de grãos armazenados (Quadro 1 e Figura 1).

Quadro 1 - Esquema de seleção dos artigos e revisões conforme a Bases de Dados compartilhados ‘Google Scholar’ dentro do Periódico da CAPES.

Bases de Dados/ e Editores acadêmicos/Periódicos	Número de resultados
Multidisciplinary Digital Publishing Institute - MDPI *	6
Springer	6
ScienceDirect (Elsevier)	12
Scientific Electronic Library Online (SciELO)	4
Hidawi *	1
ResearchGate	3
PubMed	1
Taylor & Francis Online*	2
Public Library of Science (PLOS)*	1
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)*	1
IntechOpen*	1
Annual Reviews*	2
The Pharma Journal	1
Wiley Online Library	1
IndianJournals.com	1
Nature Research*	1

(*) Editores acadêmicos/Periódicos.

Figura 1 - Visualização do número de citações de revistas nas Bases de Dados compartilhadas do ‘Google Scholar’ no Periódico da CAPES.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram encontradas 4170 publicações durante a pesquisa, com foco em diferentes descritores e palavras-chave. Após aplicar os critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados 46 estudos para a síntese desta revisão, incluindo artigos, revisões e capítulos de livros. Conforme a Base de dados do Google Acadêmico, a plataforma mais acessada foi a ScienceDirect, pertencente à Elsevier, com 12 publicações. A ScienceDirect abrange diversas áreas do conhecimento, incluindo ciências naturais, sociais, medicina, engenharia e tecnologia (Quadro 1).

As revistas *Journal of Stored Products Research* e *Annual Review of Entomology* foram as mais acessadas durante a pesquisa. O *Journal of Stored Products Research* se dedica ao estudo de produtos armazenados, como grãos, sementes e alimentos, abordando temas como controle de pragas, tecnologia de armazenamento e perdas pós-colheita. Já a *Annual Review of Entomology* fornece revisões atualizadas sobre vários aspectos da entomologia, incluindo bioecologia, comportamento e controle de insetos.

Ambas as revistas são conhecidas por sua qualidade e relevância no campo da pesquisa sobre tecnologia de produtos armazenados e área de entomologia, respectivamente. Elas desempenham um papel importante na disseminação do conhecimento científico e no avanço dessas áreas de estudo.

Controle de pragas de produtos armazenados

As culturas de grãos são fontes dominantes de nutrição para a maioria da população mundial, especialmente nos países em desenvolvimento. Devido às condições ambientais adversas e aos métodos de controle inadequados, esses produtos estão sujeitos a interferências bióticas, como a presença de roedores, fungos, ácaros e, principalmente, insetos-pragas (TADDESE et al., 2020).

Diferentes grupos de insetos-pragas infestam commodities alimentares e seus produtos processados, causando perdas na qualidade dos produtos armazenados. Entre eles estão: *Sitophilus zeamais* Mots.; *S. oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae); *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae); *Acanthoscelides obtectus* (Say), *Callosobruchus maculatus* (F.); (Coleoptera: *Crysolimadae-Bruchinae*); *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae); *Lasioderma serricorne* (L.) (Coleoptera: Anobiidae), *Liposcelis bostrychophila* (Badonnel) (Psocoptera:

Liposcelididae) e *Oryzaephilus surinamensis* (L.) (Coleoptera: Silvanidae) (CHAUDAHARI et al., 2021; SINGH et al., 2021).

Os métodos convencionais de controle baseiam-se no uso de inseticidas sintéticos, pois são ferramentas eficazes e viáveis para reduzir as populações de pragas a níveis aceitáveis (FREITAS et al., 2016). Entre os inseticidas sintéticos estão os produtos à base de organofosforados e piretroides, além dos fumigantes à base de fosfina. Os fumigantes sintéticos são medidas mais eficazes em todos os estágios de desenvolvimento dos insetos dentro das instalações de armazenamento, devido à facilidade de difusão em locais fechados, mantendo a integridade dos alimentos para comercialização (NAYAK et al., 2020; SINGH et al., 2021).

Apesar da eficácia dos produtos sintéticos, a aplicação em larga escala e o uso indiscriminado resultaram em efeitos adversos sobre organismos não-alvo e no meio ambiente, bem como no desenvolvimento de resistência entre insetos-pragas. Portanto, é necessário buscar alternativas mais seguras, como a utilização de produtos de origem vegetal, como é o caso dos inseticidas botânicos (PIMENTEL et al., 2007; NAYAK et al., 2020; SINGH et al., 2021; CHAUDAHARI et al., 2021).

Considerações gerais sobre o gorgulho *Sitophilus zeamais*

O gorgulho-do-milho, *Sitophilus zeamais* Motschulsky, 1855 (Coleoptera: Curculionidae), é uma praga cosmopolita e primária do milho. Ele ataca diretamente o produto comercializado (grão/semente) e possui hábitos polifágicos, atacando outros cereais e produtos processados. Apresenta infestação cruzada, ou seja, ocorre tanto no campo quanto no armazenamento. Ao infestar os grãos, os estágios imaturos do inseto se desenvolvem, deixando os grãos destruídos e esvaziados de seus valores nutricionais, tornando-se inviáveis para a comercialização e germinação. Além de contribuir para a entrada de pragas secundárias, ácaros e fungos, resultando em quedas no valor de mercado local e internacional (NWOSU, 2018; DEVI et al., 2017; BARROS et al., 2022).

Os adultos de *S. zeamais* medem cerca de 3 mm de comprimento e possuem coloração castanho-escura com manchas avermelhadas em seus élitros, que são visíveis logo após a emergência. Eles possuem cabeça projetada à frente e rostru recurvado, onde estão inseridas suas peças bucais. O pronoto é fortemente pontuado e os élitros são estriados. As larvas têm coloração amarelo-claro com pontas escuras na cabeça, e as pupas são esbranquiçadas (DEVI et al., 2017; KUMARI et al., 2022).

Devi et al., (2017) citaram os seguintes dados biológicos sobre o período médio de desenvolvimento de *S. zeamais* em condições laboratoriais: o período de desenvolvimento dos ovos, dos instares larvais, das pupas e dos adultos foi de 6,9; 5,8; 7,0; 8,4; 7,5; 12,5 e 3,5 dias, respectivamente. A duração total do ciclo de vida é de 51,6 dias; a longevidade média dos machos é de 67,4 dias (variando de 61,8 a 73 dias) e das fêmeas é de 105,9 dias (variando de 97,1 a 114,7 dias); o período médio de pré-acasalamento é de aproximadamente 3 dias; a longevidade feminina é de 105,9 dias e a longevidade masculina é de 67,4 dias.

Os ovos são colocados em pequenas cavidades perfuradas pela fêmea adulta. Após a oviposição, essas cavidades são fechadas por uma substância mucilaginosa secretada por ela. Logo, essa substância endurece, deixando uma pequena área elevada na superfície dos grãos, indicando que o grão está infestado. Os ovos recém-colocados são translúcidos e tornam-se opacos (DEVI et al., 2017). O período médio de incubação do ovo é de 6 a 9 dias a 25 °C. As larvas adentram os grãos, onde se alimentam e completam seu estágio larval (quatro instares) dentro do grão. Em seguida, empupam-se até a emergência e saída do adulto (KUMARI et al., 2022). O gorgulho-do-milho apresenta comportamento canibal entre indivíduos, por isso raramente emerge mais de um indivíduo adulto por grão (FARONI; SOUSA, 2006).

O desenvolvimento completo do inseto é possível entre 15 e 35 °C, levando aproximadamente 35 dias em condições ótimas de 27 °C e 70% de umidade relativa. Esse inseto é um excelente voador e pode causar infestação antes da colheita e em locais de armazenamento. Os adultos têm longa vida útil, podendo viver vários meses a um ano. A duração real do ciclo pode variar de 31 a 37 dias, e em condições ótimas, podem viver de 4 a 5 meses (FARONI; SOUSA, 2006).

O uso de produtos sintéticos registrados é altamente eficaz para controlar as populações do gorgulho-do-milho. No entanto, apesar da eficácia das substâncias presentes nesses produtos, sua aplicação contínua e a dependência excessiva de um único produto têm ocasionado limitações e efeitos nocivos à saúde e ao meio ambiente (NAYAK et al., 2020; ACHIMÓN et al., 2022). Nesse contexto, o interesse considerável em desenvolver alternativas mais seguras, como a utilização de botânicos, tem recebido grande atenção, pois apresentam baixa toxicidade e persistência residual, representando pouca ameaça à saúde humana e ao ambiente (ISMAN, 2006; YANG et al., 2020).

Inseticidas botânicos

A comprovação do uso de inseticidas botânicos no controle de pragas agrícolas remonta a dois mil anos atrás, quando já eram utilizados em regiões da China, Grécia e Índia, antes de se tornarem amplamente aceitos (ISMAN, 2006; DOUGOUD et al., 2019; IQBAL et al., 2021). As plantas evoluíram diversos compostos metabólitos secundários, que muitas vezes estão associados a fatores ambientais, como bióticos (herbívoros e patógenos) e abióticos (temperatura, fatores edafoclimáticos e variações sazonais), desempenhando um papel fundamental na sobrevivência em ambientes estressantes e atuando como defesa química (ISMAN, 2006; PAVELLA; BENELLI, 2016; PRAKASHI et al., 2022).

A disponibilidade limitada, a legislação vigente rígida e o alto custo na aquisição de produtos fitossanitários fazem com que o uso de botânicos seja uma alternativa válida e aceita para a proteção de grãos armazenados (ISMAN et al., 2008; DOUGOUD et al., 2019). No entanto, embora a utilização de inseticidas botânicos tenha um papel fundamental no manejo integrado de pragas de grãos armazenados, suas recomendações frequentemente podem ser questionadas. Isso se deve à instabilidade do produto, eficácia inconsistente, disponibilidade limitada e aos diferentes modos de ação pouco conhecidos em relação à toxicidade para espécies não-alvo (DOUGOUD et al., 2019; PRAKASH et al., 2022).

De fato, antes de 1930, os inseticidas botânicos eram amplamente utilizados no controle de insetos-pragas e microrganismos em grãos armazenados. Entre eles estão a azadiractina, rotenonas, piretrinas I e II, nicotina, entre outros, que foram comprovados como eficazes para o manejo integrado de pragas (VELASQUEZ et al., 2017). No entanto, a descoberta de inseticidas sintéticos com eficácia comprovada, pertencentes a grupos químicos como organofosforados, clorados e carbamatos, juntamente com a crescente demanda por alimentos, levaram a uma intensificação da tecnologia agrícola visando altas produtividades. Ao longo dos anos, surgiram sérios problemas decorrentes do uso constante e abusivo dessas tecnologias (SOUTO et al., 2021).

A conscientização acerca dos graves problemas relacionados à persistência residual dos produtos no meio ambiente, afetando a biodiversidade, impulsionou a busca por pesticidas mais ecológicos, que se degradam com o tempo. Além disso, a legislação de diversos países passou a aprovar o uso de derivados vegetais que atendam aos padrões mínimos exigidos para promover uma produção sustentável. Essa conscientização

também fortaleceu as políticas públicas voltadas para a redução do uso de produtos fitossanitários (ISMAN; GRIENEISEN, 2014; SOUTO et al., 2021).

O controle de insetos-pragas por meio de inseticidas botânicos é amplamente utilizado por agricultores tradicionais de subsistência, principalmente em países em desenvolvimento, que chegam a utilizar até 100% de produtos à base desses inseticidas (DOUGOUD et al., 2019; IQBAL et al., 2021). Há relatos de que existem mais de 2.500 espécies de plantas pertencentes a aproximadamente 235 famílias botânicas que possuem atividades biológicas no controle de pragas (ISMAN, 2006; DOUGOUD et al., 2019). Dentre as famílias frequentemente estudadas para a obtenção de óleos essenciais estão Lauraceae, Myrtaceae, Lamiaceae, Rutaceae, Apiaceae, Asteraceae, Poaceae, Cupressaceae, Piperaceae e Zingiberaceae (EBADOLLAHI; SENDI, 2015).

Nesse cenário, novas fontes de botânicos alcançaram status comercial nos últimos vinte anos, incluindo piretrinas, rotenonas, azadiractina e óleos essenciais (SOUTO et al., 2021). Dentre as fontes botânicas, sejam elas extratos brutos ou produtos químicos naturais, os óleos essenciais (OEs) de plantas aromáticas têm demonstrado resultados promissores como agentes com múltiplos mecanismos de ação, alta eficácia contra artrópodes, baixa toxicidade em vertebrados não-alvo e potencial para formulação com sinergistas e nanopesticidas (PAVELA; BENELLI, 2016).

Óleos essenciais

Os óleos essenciais (OEs) são sintetizados pelas plantas e desempenham papéis fundamentais nos processos de defesa vegetal, atraindo polinizadores e insetos benéficos. Além disso, eles conferem aromas e sabores específicos, sendo de interesse para as indústrias farmacêuticas e cosméticas (CAMPOLO et al., 2018). A composição volátil dos OEs é sintetizada em estruturas secretoras, como tricomas e ductos de resina, encontrados em diferentes partes das plantas.

Esses compostos podem ser extraídos por destilação a vapor, hidrodestilação e prensagem a frio (no caso de óleos essenciais cítricos). Os OEs podem ser classificados em dois grandes grupos complexos: I - Terpenoides (monoterpenos, diterpenos e sesquiterpenos) e II - Fenilpropanoides de baixo peso molecular, que são produzidos por vias metabólicas secundárias de biossíntese presentes no citosol e nos cloroplastos (REGNAULT-ROGER et al., 2012; PAVELA; BENELLI, 2016).

Os óleos essenciais (OEs) são compostos orgânicos complexos que apresentam propriedades inseticidas contra insetos-pragas de grãos armazenados. Esses compostos têm a capacidade de demonstrar toxicidade, repelência, efeito antialimentar, supressão da fertilidade e inibição da oviposição de insetos adultos (CAMPOLO et al., 2018). Além de serem eficazes no controle de pragas em grãos armazenados, os OEs também têm mostrado eficácia na proteção de plantas contra insetos-pragas mastigadores e sugadores, além de inibir a oviposição de moscas-das-frutas em cultivos frutíferos (REGNAULT-ROGER et al., 2012).

Estudos recentes têm fortalecido a evidência de que o uso de óleos essenciais (OEs) apresenta atividades neurotóxicas semelhantes aos inseticidas sintéticos, agindo sobre alvos moleculares nos organismos dos insetos. Essas atividades neurotóxicas envolvem o fechamento dos canais de sódio e cálcio por tensão, inibição da enzima acetilcolinesterase (AChE) afetando a função muscular e neuronal dos insetos, interação com os receptores sinápticos do GABA, alterando a atividade de coordenação motora e levando à paralisia e morte (FARAONE et al., 2015; PAVELA; BENELLI, 2016; CAMPOLO et al., 2018; SOUTO et al., 2021).

Estudos sugerem que os óleos essenciais (OEs) podem ser utilizados em conjunto com inseticidas sintéticos, em uma estratégia de alternância, para o gerenciamento de problemas de resistência. Através desse conhecimento, é possível otimizar a eficácia dos OEs como inseticidas, direcionando sua aplicação de acordo com as pragas específicas a serem controladas. Além disso, a combinação desses dois tipos de produtos pode resultar em uma ação sinérgica, devido à diversidade química dos OEs e seus diferentes espectros de ação sobre os organismos-alvo (ISMAN, 2006; PAVELA; BENELLI, 2016).

Óleos essenciais como sinergistas

Combinações de óleos essenciais (OEs) podem resultar em efeitos de sinergismo ou antagonismo, o sinergismo ocorre quando a combinação de dois ou mais agentes estressantes potencializa a toxicidade em relação aos efeitos individuais observados em concentrações subletais. Por outro lado, o antagonismo ocorre quando a atividade de um agente é reduzida ou inibida pela presença de outro (DAS, 2014; BRITO et al., 2021; REDDY; CHOWDARY, 2021).

Tanto sinergismo quanto ao efeito antagônico são indicados por muitos termos como, coeficiente de co-toxicidade, razão de sinergismo, percentual de mortalidade (REDDY; CHOWDARY, 2021). Por essa razão, o sinergismo é uma estratégia

interessante para potencializar os efeitos de formulação combinadas, permitindo concentrações mais baixas sejam eficazes no manejo integrado de pragas em superar resistências metabólicas, ou até mesmo, retardar a algum tipo de manifestação de resistência hereditária de genes, além de aumentar a vida útil de prateleira dos inseticidas comerciais (RIBEIRO et al., 2003; FARAONE et al., 2015).

O butóxido de piperonila (PBO), sinergista comercial de inseticidas, é um produto químico que aprimora a propriedades ativas das piretrinas, rotenonas e carbamatos, e tem sido usado comercialmente desde 1940, como potencializador de inseticidas piretróides. A sua especificidade na inibição da atividade de desintoxicação de enzimas do sistema citocromo P-450 contribuiu para seu sucesso como sinergista (SNOECK et al., 2017). Porém, o PBO demonstrou suspeita toxicidade aguda e crônica em espécies não-alvo, resultando menor interesse em utilização desse sinergista comercial (WALIA et al., 2004).

Alguns trabalhos evidenciaram que os OEs combinados com outros botânicos e sintéticos podem exercer atividades sinérgicas contra pragas de culturas e pragas de armazenados (FARAONE et al., 2015; DASSANAYAKE et al., 2021). Lima e colaboradores (2011), verificaram sinergismo do OE de alecrim-pimenta com o monoterpene timol combinado em espécies de *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). Investigações com OEs de lavanda e tomilho combinado com inseticida Imidacloprido, revelaram suscetibilidade de *Myzus persicae* s.l. (Hemiptera: Aphididae) (pulgão), a mistura dos OEs com inseticida indicou razão de sinergismo de 19,8 no estudo (FARAONE et al. 2015). O óleo essencial de Piper aduncum apresenta potencial como sinergista com inseticidas à base de organofosforado, indicando alternativa ao PBO (FAZOLIN et al., 2017).

Nem sempre a sinergia pode ocorrer, exemplo claro, é relatado por Faraone et al. (2015), descreveram ação antagônica em certos OEs com os inseticidas sintéticos. Investigações relatam a volatilização dos compostos presentes nos óleos essenciais, ou até a misturas de mais de um dos compostos poderiam ocasionar este fenômeno antagônico (ARAUJO et al., 2012; PAVELA, 2014). Nesses casos, é importante avaliar cuidadosamente a combinação de OEs no desenvolvimento de formulações para garantir que a eficácia de cada componente não seja comprometida pela presença do outro (DAS, 2014; REDDY; CHOWDARY, 2021).

A compreensão dos efeitos de sinergismo e antagonismo nas combinações de óleos essenciais (OEs) é crucial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle de pragas. Por meio de estudos laboratoriais e de campo, é possível identificar as combinações mais promissoras e determinar as concentrações ideais para obter os melhores resultados. Essa abordagem pode contribuir para otimizar o uso de OEs como alternativa aos inseticidas sintéticos, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e com menor impacto ambiental.

Aspectos gerais da espécie Piper aduncum L.

A pimenta-de-macaco (*Piper aduncum* L.) é uma planta arbustiva aromática endêmica da Amazônia, pertencente à família Piperaceae, que tem despertado interesse devido ao seu potencial como fonte de óleo essencial no controle de pragas de produtos armazenados (BERGO et al., 2005). Estudos científicos têm destacado a eficácia do óleo essencial de pimenta-de-macaco no combate a diversas doenças humanas causadas por agentes infecciosos parasitários e bacterianos, tanto de forma direta quanto indireta (POTZERNHEIN et al., 2012; SAUTER et al., 2012; DUROFIL et al., 2021).

O óleo essencial de *P. aduncum* (OEPA) é composto por fenilpropanoides, sendo o dilapiol o composto majoritário, seguido pela miristicina e apiol. Quanto aos monoterpenos, estão incluídos o 1,8-cineol, o β -ocimeno e o γ -terpineno (DUROFIL et al., 2021). Vale ressaltar que o composto majoritário do OEPA pode variar de acordo com diferenças genéticas e condições ambientais, como as coordenadas geográficas (SALEHI et al., 2019).

O óleo essencial (OE) extraído da pimenta-de-macaco tem sido amplamente utilizado na agricultura devido às suas propriedades inseticidas, larvicidas, antibacterianas e antifúngicas. Essas propriedades tornam o OE um valioso recurso no controle de pragas que afetam os cultivos agrícolas e ambientes de armazenamento, contribuindo para a redução do uso de pesticidas sintéticos e para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis (FAZOLIN et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017; DUROFIL et al., 2021).

Como característica marcante das Piperáceas, as espécies de *P. aduncum* contêm uma quantidade significativa de lignanas ligadas a um grupo químico metileno dióxido fenil, que formam o dilapiol, o fenilpropanoide mais abundante nessa espécie (ESTRELA et al., 2006). O dilapiol é comumente encontrado em maior abundância nos óleos

essenciais da Amazônia, representando mais de 70% da composição total (DUROFIL et al., 2021).

O dilapiol apresenta um efeito inibidor de esterases semelhante ao sinergista comercial PBO, porém esse efeito não ocorre imediatamente. É necessário um tempo de 3 a 4 horas após a aplicação, o que indica que o OEPA pode auxiliar na inibição de enzimas desintoxicantes, aumentando assim o potencial do inseticida comercial (SHANKARGANESH et al., 2009).

Quanto à bioatividade do OEPA, já foram relatados estudos sobre sua toxicidade em relação a insetos-pragas de grãos armazenados (ESTRELA et al., 2006; FAZOLIN et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2017), sua capacidade de repelência (OLIVEIRA et al., 2017) e sua capacidade de reduzir as taxas de crescimento, além de atuar como agente sinérgico em misturas com inseticidas sintéticos (FAZOLIN et al., 2016). Esses achados reforçam o potencial do OEPA no controle de pragas agrícolas e na proteção de grãos armazenados.

O potencial da pimenta-de-macaco como fonte de óleo essencial no controle de pragas e doenças representa uma oportunidade para o desenvolvimento de produtos mais naturais e sustentáveis na agricultura e na saúde pública. No entanto, são necessárias mais pesquisas e estudos para aprimorar as técnicas de extração e formulação do óleo essencial, além de avaliar sua eficácia em diferentes contextos agrícolas e de saúde, visando maximizar seus benefícios e minimizar eventuais impactos negativos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O OEPA é uma alternativa promissora e sustentável no controle de pragas de produtos armazenados, como o *Sitophilus zeamais*.

Além de seu potencial inseticida e repelente, o OEPA é um composto de origem natural, o que o torna uma opção mais segura e ecologicamente correta em comparação aos inseticidas químicos convencionais.

A segurança do uso do OEPA em termos de resíduos em produtos agrícolas também é importante para garantir sua viabilidade como uma solução eficaz e segura no controle de pragas de produtos armazenados.

REFERÊNCIAS

ACHIMÓN, F.; PESCHIUTTA, M. L.; BRITO, V. D.; BEATO, M.; PIZZOLITTO, R. P.; ZYGADLO, J. A.; ZUNINO, M. P. Exploring contact toxicity of essential oils against *Sitophilus zeamais* through a Meta-Analysis Approach. **Plants**, v. 11, n. 22, p. 3070, 2022.

- ARAÚJO, W. S.; ESPÍRITO-SANTO FILHO, K. Edge effect benefits galling insects in the Brazilian Amazon. **Biodiversity and Conservation**, v. 21, n. 3, p. 2991-2997, 2012.
- BARROS, F. A.; RADÜNZ, M.; SCARIOT, M. A.; CAMARGO, T. M.; NUNES, C. F.; DE SOUZA, R. R.; DAL MAGRO, J. Efficacy of encapsulated and non-encapsulated thyme essential oil (*Thymus vulgaris* L.) in the control of *Sitophilus zeamais* and its effects on the quality of corn grains throughout storage. **Crop Protection**, v. 153, p. 105885, 2022.
- BERGO, C. L.; MENDONÇA, H. A. de; SILVA, M. R. da. Efeito da época e frequência de corte de pimenta longa (*Piper hispidinervum* C. DC.) no rendimento de óleo essencial. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 111-117, 2005.
- BRITO, V. D.; ACHIMÓN, F.; PIZZOLITTO, R. P.; RAMÍREZ SÁNCHEZ, A.; GÓMEZ TORRES, E. A.; ZYGADLO, J. A.; ZUNINO, M. P. An alternative to reduce the use of the synthetic insecticide against the maize weevil *Sitophilus zeamais* through the synergistic action of *Pimenta racemosa* and *Citrus sinensis* essential oils with chlorpyrifos. **Journal of Pest Science**, v. 94, p. 409-421, 2021.
- CAMPOLO, O.; GIUNTI, G.; RUSSO, A.; PALMERI, V.; ZAPPALÀ, L. Essential oils in stored product insect pest control. **Journal of Food Quality**, v. 2018, p. 1-18, 2018.
- CHAUDHARI, A. K.; SINGH, V. K.; KEDIA, A.; DAS, S.; DUBEY, N. K. Essential oils and their bioactive compounds as eco-friendly novel green pesticides for management of storage insect pests: prospects and retrospects. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 18918-18940, 2021.
- DAS, S. K. Scope and relevance of using pesticide mixtures in crop protection: a critical review. **International Journal of Environmental Science and Toxicology**, v. 2, n. 5, p. 119-123, 2014.
- DASSANAYAKE, M. K.; CHONG, C. H.; KHOO, T. J.; FIGIEL, A.; SZUMNY, A.; CHOO, C. M. Synergistic field crop pest management properties of plant-derived essential oils in combination with synthetic pesticides and bioactive molecules: A review. **Foods**, v. 10, n. 9, p. 2016, 2021.
- DEVI, S. R.; THOMAS, A.; REBIJITH, K. B.; RAMAMURTHY, V. V. Biology, morphology and molecular characterization of *Sitophilus oryzae* and *S. zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Stored Products Research**, v. 73, p. 135-141, 2017.
- DOUGOUD, J.; TOEPFER, S.; BATEMAN, M.; JENNER, W. H. Efficacy of homemade botanical insecticides based on traditional knowledge. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 39, p. 1-22, 2019.
- DUROFIL, A.; RADICE, M.; BLANCO-SALAS, J.; RUIZ-TÉLLEZ, T. *Piper aduncum* essential oil: a promising insecticide, acaricide and antiparasitic. A review. **Parasite**, v. 28, 2021.
- EBADOLLAHI, A.; JALALI SENDI, J. A review on recent research results on bio-effects of plant essential oils against major Coleopteran insect pests. **Toxin Reviews**, v. 34, n. 2, p. 76-91, 2015.
- ESTRELA, J. L. V.; FAZOLIN, M.; CATANI, V.; ALÉCIO, M. R.; LIMA, M. S. de. Toxicidade de óleos essenciais de *Piper aduncum* e *Piper hispidinervum* em *Sitophilus zeamais*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 217-222, 2006.
- FARAONE, N.; HILLIER, N. K.; CUTLER, G. C. Plant essential oils synergize and antagonize toxicity of different conventional insecticides against *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). **PLoS One**, v. 10, n. 5, p. e0127774, 2015.
- FARONI, L. R. D. A.; SOUSA, A. H. de. Aspectos biológicos e taxonômicos dos principais insetos-praga de produtos armazenados. **Tecnologia de Armazenagem em Sementes**, v. 1, p. 371-402, 2006.
- FAZOLIN, M.; ESTRELA, J. L. V.; CATANI, V.; ALÉCIO, M. R.; LIMA, M. S. de. Propriedade inseticida dos óleos essenciais de *Piper hispidinervum* C. D.C.; *Piper aduncum* L. e *Tanaecium nocturnum* (Barb.

Rodr.) Bur. & K. Shum sobre *Tenebrio molitor* L., 1758. **Ciência e Agrotecnologia**, p. 31, n. 1, p. 113-120, 2007.

FAZOLIN, M.; ESTRELA, J. L. V.; MEDEIROS, A. F. M.; GOMES, L. P.; DA SILVA, I. M.; DE FARIAS SILVA, M. S. Potencial sinérgico do óleo de Piper aduncum para inseticidas formulados com misturas de princípios ativos. **Revista de Ciências Agrárias-Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 59, n. 4, p. 362-369, 2016.

FAZOLIN, M.; ESTRELA, J. L. V., MEDEIROS, A. F. M., DA SILVA, I. M., GOMES, L. P. Sinérgico alternativo para inseticidas inibidores de acetilcolinesterase. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 11, n.3, p. 232-240, 2017.

FREITAS, R. S.; FARONI, L. R. A.; SOUSA, A. H. Hermetic storage for control of common bean weevil, *Acanthoscelides obtectus* (Say). **Journal of Stored Products Research**, v. 66, p. 1-5, 2016.

IQBAL, T.; AHMED; N.; SHAHJEER, K.; AHMED, S.; AL-MUTAIRI, K. A.; KHATER, H. F.; ALI, R. F. Botanical Insecticides and their Potential as Anti-Insect/Pests: Are they Successful against Insects and Pests?. In: **Global Decline of Insects**. IntechOpen, 2021.

ISMAN, M. B. Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. **Annual Review of Entomology**, v. 51, p. 45-66, 2006.

ISMAN, M. B.; GRIENEISEN, M. L. Botanical insecticide research: many publications, limited useful data. **Trends in Plant Science**, v. 19, n. 3, p. 140-145, 2014.

ISMAN, M. B; WILSON, J. A.; BRADBURY, R. Insecticidal activities of commercial rosemary oils (*Rosmarinus officinalis*.) against larvae of *Pseudaletia unipuncta* and *Trichoplusia* in relation to their chemical compositions. **Pharmaceutical Biology**, v. 46, n. 1-2, p. 82-87, 2008.

KUMARI, N.; KUMAR, V.; KUMAR, A.; KUMAR, A.; SATI, K.; PRAKASH, O.; KAPOOR, N. Biology of *Sitophilus zeamais* Motsch. On maize grains under laboratory condition. **The Pharma Innovation Journal**, v. 11, n. 9, p. 1388-1391, 2022.

LOPEZ-CASTILLO, L. M; FLORES-RIVERA, F. M. D; WINKLER, R; GARCIA-LARA, S. Increase of peroxidase activity in tropical maize after recurrent selection to storage pest resistance. **Journal of Stored Products Research**, v. 75, p. 47-55, 2018.

MIDEGA, C. A.; MURAGE, A. W.; PITTCCHAR, J. O.; KHAN, Z. R. Managing storage pests of maize: Farmers' knowledge, perceptions and practices in western Kenya. **Crop Protection**, v. 90, p. 142-149, 2016.

NAYAK, MANOJ, K.; DAGLISH, G. J.; PHILLIPS, T.W.; EBERT, P.R. Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: a global perspective. **Annual Review of Entomology**, v. 65, p. 333-350, 2020.

NWOSU, L. C. Maize and the maize weevil: Advances and innovations in postharvest control of the pest. **Food Quality and Safety**, v. 2, n. 3, p. 145-152, 2018.

PAVELA, R.; BENELLI, G. Essential oils as ecofriendly biopesticides? Challenges and constraints. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 12, p. 1000-1007, 2016.

PATIÑO-BAYONA, W. R.; NAGLES GALEANO, L. J.; BUSTOS CORTES, J. J.; DELGADO ÁVILA, W. A.; HERRERA DAZA, E.; SUÁREZ, L. E. C.; PATIÑO-LADINO, O. J. Effects of Essential Oils from 24 Plant Species on *Sitophilus zeamais* Motsch (Coleoptera, Curculionidae) **Insects**, v. 12, n. 6, p. 532, 2021.

PIMENTEL, M. A. G., FARONI, L. R. D. A., TÓTOLA, M. R., GUEDES, R. N. C. Phosphine resistance, respiration rate and fitness consequences in stored-product insects. **Pest Management Science: Formerly Pesticide Science**, v. 63, n. 9, p. 876-881, 2007.

- POTZERNHEIM, M. C. L.; BIZZO, H. R.; SILVA, J. P.; VIEIRA, R. F. Chemical characterization of essential oil constituents of four populations of *Piper aduncum* L. from Distrito Federal, Brazil. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 42, p. 25-31, 2012.
- PRAKASH, B.; SINGH, P. P.; KUMAR, A.; GUPTA, V. Botanicals for Sustainable Management of Stored Food Grains: Pesticidal Efficacy, Mode of Action and Ecological Risk Assessment Using Computational Approaches. **Anthropocene Science**, v. 1, n. 1, p. 62-79, 2022.
- OLIVEIRA, J. V.; FRANÇA, S. M. D.; BARBOSA, D. R.; DUTRA, K. D. A.; ARAUJO, A. M. N. D.; NAVARRO, D. M. D. A. F. Fumigation and repellency of essential oils against *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: *Chrysomelidae: Bruchinae*) in cowpea. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 10-17, 2017.
- REDDY, D. S.; CHOWDARY, N. M. Botanical biopesticide combination concept - a viable option for pest management in organic farming. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v. 31, n. 1, p. 1-10, 2021.
- REGNAULT-ROGER, C.; VINCENT, C.; ARNASON, J. T. Essential oils in insect control: low-risk products in a high-stakes world. **Annual Review of Entomology**, v. 57, p. 405-424, 2012.
- RIBEIRO, B. M.; GUEDES, R. N. C.; OLIVEIRA, E. E., SANTOS, J. P. Insecticide resistance and synergism in Brazilian populations of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Stored Products Research**, v. 39, n. 1, p. 21-31, 2003.
- SALEHI, B.; ZAKARIA, Z. A.; GYAWALI, R.; IBRAHIM, S. A.; RAJKOVIC, J.; SHINWARI, Z. K.; KHAN, T.; SHARIFI-RAD, J.; OZLEYEN, A.; TURKDOMENZ, E.; VALUSSI, M.; BOYUNEGMEZ TUMER, T.; FIDALGO, L. M. MARTORELL, M.; SETZER, W. N. *Piper species*: A comprehensive review on their phytochemistry, biological activities and applications. **Molecules**, v. 24, n. 7, p.1364, 2019.
- SAUTER, I. P.; ROSSA, G. E; LUCAS, A. M.; CIBULSKI, S. P.; ROEHE, P. M.; SILVA, L. A.; ROTT, M. B.; VARGAS, R. M.; CASSEL, E.; VON POSER, G. L. Chemical composition and amoebicidal activity of *Piper hispidinervum* (Piperaceae) essential oil. **Industrial Crops and Products**, v. 40, p. 292-295, 2012.
- SHANKARGANESH, K.; SUBAHMANYAM, B.; WALIAAND S.; DHINGRA, S. Dillapiole mediated esterase inhibition in insecticide resistant *Spodoptera litura* (Fabricius). **Pesticide Research Journal**, v. 21, n. 2, p. 143-147, 2009.
- SINGH, K. D.; MOBOLADE, A. J.; BHARALI, R., SAHOO, D.; RAJASHEKAR, Y. Main plant volatiles as stored grain pest management approach: A review. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 4, p. 100127, 2021.
- SNOECK, S.; GREENHALGH, R.; TIRRY, L.; CLARK, R. M.; VAN LEEUWEN, T.; DERMAUW, W. The effect of insecticide synergist treatment on genome-wide gene expression in a polyphagous pest. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 13440, 2017.
- SOUTO, A. L.; SYLVESTRE, M.; TÖLKE, E. D.; TAVARES, J. F., BARBOSA-FILHO, J. M.; CEBRIÁN-TORREJÓN, G. Plant-derived pesticides as an alternative to pest management and sustainable agricultural production: Prospects, applications and challenges. **Molecules**, v. 26, n. 16, p. 4835, 2021.
- TADDESE, M., DIBABA, K., BAYISSA, W., HUNDE, D., MENDESIL, E., KASSIE, M., MUTUNGI, C.; TEFERA, T. Assessment of quantitative and qualitative losses of stored grains due to insect infestation in Ethiopia. **Journal of Stored Products Research**, v. 89, p.101689. 2020.
- VELASQUEZ, J.; CARDOSO, M. H.; ABRANTES, G.; FRIHLING, B. E.; FRANCO, O. L.; MIGLIOLO, L. The rescue of botanical insecticides: A bioinspiration for new niches and needs. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 143, p. 14-25, 2017.

WALIA, S.; SAHA, S.; PARMAR, B. S. Liquid chromatographic method for the analysis of two plant based insecticide synergists dillapiole and dihydrodillapiole. **Journal of Chromatography A**, v. 1047, n. 2, p. 229-233, 2004.

YANG, Y.; ISMAN, M. B.; TAK, J. H. Insecticidal activity of 28 essential oils and a commercial product containing *Cinnamomum cassia* bark essential oil against *Sitophilus zeamais* Motschulsky. **Insects**, v. 11, n. 8, p. 474, 2020.