CAPÍTULO DO LIVRO – AGRICULTURA SUSTENTÁVEL E SANIDADE VEGETAL SOLOS, ÁGUA, BIOINSUMOS E MANEJO INTEGRADO - PUBLICADO POR: EDITORA MANUAL
ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

CAPÍTULO 5

ALHO (*Allium sativum* L .) COMO FERRAMENTA BIOHERBICIDA: EVIDÊNCIAS ALELOPÁTICAS E USOS NO MANEJO SUSTENTÁVEL DE PLANTAS ESPONTÂNEAS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-5

Hyago Magno Ramos, e-mail: hyago.ramos@arapiraca.ufal.br, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/2398837423352555
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Maria Laiane da Silva, e-mail: maria.laiane@arapiraca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5197880533423893
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
José Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688
Bruna Oliveira Alves, e-mail:oliveirabruna791@gmail.com, URL lattes:http://lattes.cnpq.br/6051040274673728

RESUMO

As plantas espontâneas constituem importante fator de redução da produtividade agrícola, e a busca por alternativas ao uso intensivo de herbicidas sintéticos tem ampliado o interesse por produtos naturais com atividade alelopática. Nesse contexto, o alho (*Allium sativum* L.) apresenta potencial como ferramenta bioherbicida devido à presença de compostos organossulfurados biologicamente ativos, como aliina, alicina, ajoeno e sulfetos de dialila. Este capítulo teve como objetivo analisar o potencial do alho no manejo sustentável de plantas espontâneas, considerando sua composição fitoquímica, os mecanismos de ação alelopática, as evidências experimentais e as possibilidades e limitações de sua aplicação agrícola. Para isso, foi realizada uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, descritiva e analítica, abrangendo principalmente estudos publicados entre 2016 e 2026. As evidências demonstram que extratos, óleos essenciais, exsudatos e compostos derivados do alho podem interferir na germinação e no desenvolvimento das plantas por meio de alterações na divisão e no alongamento celular, no equilíbrio hormonal, na absorção de nutrientes, na atividade fotossintética e no metabolismo oxidativo. Os efeitos apresentam forte relação com a concentração e a sensibilidade da espécie receptora, podendo ocorrer estímulo em doses reduzidas e inibição em concentrações elevadas. Resultados experimentais indicam potencial para redução da germinação e do crescimento de plantas espontâneas, com destaque para *Echinochloa crus-galli*; entretanto, a ausência de seletividade, a volatilidade e a rápida degradação dos compostos ativos, além da escassez de estudos de campo, limitam sua aplicação prática. Tecnologias de formulação e encapsulamento podem contribuir para aumentar a estabilidade e a persistência desses compostos. Conclui-se que o alho apresenta potencial como fonte de moléculas e produtos de ação bioherbicida, porém são necessários estudos adicionais de campo, padronização das formulações, definição de doses seletivas e avaliações ambientais e econômicas antes de sua utilização em maior escala, devendo ser considerado como ferramenta complementar do manejo integrado de plantas espontâneas.

PALAVRAS-CHAVE: *Allium sativum*; alelopatia; bioherbicida; plantas espontâneas; compostos organossulfurados; manejo integrado.

1. INTRODUÇÃO

As plantas espontâneas constituem um dos principais fatores de redução da produtividade agrícola, pois competem com as culturas por água, luz, nutrientes e espaço, além

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

de poderem atuar como hospedeiras de insetos-praga e fitopatógenos. O controle dessas espécies tem sido realizado predominantemente por herbicidas sintéticos, cuja utilização intensiva e repetitiva favorece a seleção de populações resistentes e aumenta os riscos de contaminação ambiental (Roberts *et al*., 2022).

Paralelamente, a presença de resíduos em alimentos, os possíveis efeitos sobre organismos não alvo e as restrições impostas a determinados princípios ativos têm estimulado a busca por métodos alternativos de manejo (Khamare *et al*., 2022). Nesse cenário, os produtos naturais de origem vegetal despertam interesse por apresentarem diversidade química e múltiplos mecanismos de ação (Scavo; Mauromicale, 2021), podendo contribuir para reduzir a dependência dos herbicidas convencionais quando associados a estratégias integradas de controle (Kostina-Bednarz *et al*., 2023).

Entre os fenômenos naturais com potencial para essa finalidade destaca-se a alelopatia, definida como a interferência positiva ou negativa exercida por uma planta sobre outros organismos mediante a liberação de metabólitos biologicamente ativos no ambiente. Essas substâncias podem alcançar as plantas receptoras por exsudação radicular, volatilização, lixiviação dos tecidos ou decomposição de resíduos vegetais (Cheng; Cheng, 2016). Quando presentes em concentrações biologicamente efetivas, os aleloquímicos podem interferir na germinação, na divisão e no alongamento celular, no equilíbrio hormonal e na absorção de nutrientes (Ren *et al*., 2018).

Também podem alterar o funcionamento do aparato fotossintético e estimular a produção de espécies reativas de oxigênio, comprometendo a integridade das membranas e o crescimento das plântulas (Ding *et al*., 2016). Por reunir diferentes sítios de ação, a alelopatia representa uma base relevante para a prospecção de moléculas naturais destinadas ao desenvolvimento de bioherbicidas (Radhakrishnan *et al*., 2018).

O alho (*Allium sativum* L.) apresenta particular interesse nessa área em razão de sua composição fitoquímica, caracterizada pela presença de aliina, alicina, ajoeno e diferentes sulfetos de dialila. Após o rompimento dos tecidos, a aliina entra em contato com a enzima aliinase e origina a alicina, composto instável e altamente reativo que pode ser convertido em outros derivados organossulfurados (Martins *et al*., 2016). A alicina é capaz de interagir com grupos tiol de proteínas, propriedade que ajuda a explicar seus efeitos sobre enzimas e processos metabólicos essenciais (Borlinghaus *et al*., 2021).

Além disso, compostos como o dissulfeto e o trissulfeto de dialila podem interferir no metabolismo oxidativo e no desenvolvimento radicular das plantas receptoras (Yang *et al*., 2019). A composição e a concentração dessas substâncias, entretanto, variam conforme o

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

genótipo, a parte vegetal utilizada, as condições de cultivo, o armazenamento e o método de extração (Batiha *et al*., 2020).

Estudos experimentais indicam que extratos, óleos essenciais, exsudatos e compostos isolados do alho podem reduzir a germinação e o crescimento de diferentes espécies vegetais. Em *Echinochloa crus-galli*, importante planta espontânea de áreas orizícolas, o óleo essencial de alho apresentou elevada atividade inibitória e provocou alterações no teor de clorofila e no sistema antioxidante das plântulas (Bai *et al*., 2023). Extratos aquosos também podem comprometer o crescimento da parte aérea, o desenvolvimento radicular e a nodulação de leguminosas, revelando que os efeitos não estão restritos às espécies espontâneas (Adeleke *et al*., 2016).

Além disso, exsudatos radiculares e compostos voláteis do alho produzem respostas fisiológicas dependentes da concentração e da sensibilidade da planta receptora (Ding *et al*., 2020). Essa relação dose–efeito pode apresentar comportamento hormético, com estímulo em baixas concentrações e inibição em doses elevadas, aspecto que exige atenção na definição de uma faixa de aplicação segura e eficiente (Hayat *et al*., 2020).

Apesar do potencial identificado, a utilização do alho como bioherbicida permanece majoritariamente em fase experimental. A volatilidade, a instabilidade e a rápida degradação dos compostos organossulfurados podem reduzir sua persistência e produzir resultados variáveis sob condições de campo (Kostina-Bednarz *et al*., 2023). A ausência de seletividade também pode ocasionar fitotoxicidade às culturas e efeitos adversos sobre microrganismos benéficos, especialmente quando extratos ou resíduos são aplicados em concentrações elevadas (Adeleke *et al*., 2016).

Tecnologias de emulsificação e encapsulamento apresentam potencial para melhorar a estabilidade, a dispersão e a liberação controlada dos compostos ativos (Rodríguez-Mejías *et al*., 2023), mas ainda demandam avaliações agronômicas, econômicas e ecotoxicológicas antes de sua adoção em escala comercial (Jayasoorya *et al*., 2024). Assim, sua aplicação deve ser compreendida como uma ferramenta complementar, integrada à rotação de culturas, à cobertura do solo e aos controles mecânico e químico racional.

Diante desse contexto, este capítulo objetiva analisar o potencial do alho como ferramenta bioherbicida para o manejo sustentável de plantas espontâneas, abordando sua composição fitoquímica, os mecanismos de ação alelopática e as evidências experimentais relacionadas ao emprego de extratos, óleos essenciais e resíduos vegetais. Também são discutidas as possibilidades de aplicação agrícola, a seletividade para as culturas, a persistência dos compostos no ambiente, os possíveis efeitos sobre organismos não alvo e as limitações

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730
relacionadas à padronização, à viabilidade econômica e à integração dessa alternativa com outras práticas de manejo.

2. METODOLOGIA

O presente capítulo de livro caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o propósito de reunir, interpretar e integrar evidências científicas sobre o potencial do alho (*Allium sativum* L.) como ferramenta bioherbicida no manejo sustentável de plantas espontâneas. A revisão concentrou-se na composição fitoquímica do alho, nos compostos associados à atividade alelopática, nos mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na fitotoxicidade e nas possibilidades de utilização de extratos, óleos essenciais, resíduos vegetais e formulações derivadas dessa espécie.

A pesquisa foi orientada pela seguinte questão: de que maneira os compostos bioativos presentes no alho podem interferir na germinação e no desenvolvimento de plantas espontâneas e ser utilizados como componentes de estratégias sustentáveis de manejo? Para responder a essa questão, foram consultadas publicações científicas e técnico-científicas relacionadas à alelopatia, aos bioherbicidas de origem vegetal, à composição fitoquímica do alho, aos compostos organossulfurados, à germinação de sementes, à fisiologia vegetal, ao estresse oxidativo, à seletividade para culturas agrícolas e ao manejo integrado de plantas espontâneas.

As buscas bibliográficas abrangeram estudos publicados principalmente entre 2016 e 2026, sem excluir referências anteriores consideradas indispensáveis à fundamentação dos conceitos de alelopatia, hormese, fitotoxicidade, produtos naturais e manejo sustentável de plantas espontâneas. A estratégia de busca empregou descritores em português e inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos *Allium sativum*, *garlic extract*, *garlic essential oil*, *garlic residues*, *garlic allelopathy*, *allelopathic compounds*, *organosulfur compounds*, *allicin*, *diallyl sulfide*, *diallyl disulfide*, *natural herbicide*, *bioherbicide*, *weed germination*, *weed management*, *phytotoxicity*, *oxidative stress* e *sustainable weed management*, além de suas correspondências em português.

Foram priorizados artigos científicos originais, revisões, dissertações, teses, capítulos de livros e documentos técnico-científicos que apresentassem relação direta entre o alho ou seus compostos e a germinação, o crescimento ou o metabolismo de plantas receptoras. Também foram considerados trabalhos sobre a caracterização química de bulbos, folhas, raízes, exsudatos e óleos essenciais, assim como pesquisas que avaliassem os efeitos de extratos aquosos, compostos voláteis, resíduos vegetais e substâncias organossulfuradas isoladas. Na

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

ausência de estudos diretamente realizados com plantas espontâneas, foram incorporadas pesquisas com espécies cultivadas quando seus resultados contribuíam para explicar os mecanismos alelopáticos, a relação entre dose e resposta ou os possíveis riscos de fitotoxicidade para culturas não alvo.

Foram incluídos estudos conduzidos em laboratório, casa de vegetação, sistemas hidropônicos, vasos e condições de campo que apresentassem informações sobre a espécie receptora, a parte do alho utilizada, o método de extração ou obtenção do composto, a concentração aplicada e as respostas avaliadas. Foram consideradas variáveis como porcentagem e velocidade de germinação, comprimento da raiz e da parte aérea, acúmulo de biomassa, índice mitótico, atividade enzimática, conteúdo de pigmentos fotossintéticos, absorção de nutrientes, concentração de espécies reativas de oxigênio, atividade antioxidante, integridade das membranas e sobrevivência das plantas.

Foram excluídas publicações sem relação direta com a questão orientadora, estudos limitados às propriedades alimentares, medicinais, antimicrobianas ou inseticidas do alho sem avaliação de efeitos sobre plantas, bem como trabalhos que não apresentassem informações suficientes sobre o material vegetal, a forma de preparação, a concentração ou as espécies receptoras. Estudos duplicados, documentos sem acesso às informações essenciais e publicações cuja abordagem não permitisse distinguir atividade alelopática de outros fatores responsáveis pela redução do crescimento vegetal também não foram considerados na síntese.

Após a identificação das publicações, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos para verificar sua adequação aos objetivos do capítulo. Os trabalhos potencialmente relevantes foram examinados integralmente, considerando-se a clareza metodológica, a pertinência temática e sua contribuição para a compreensão do potencial bioherbicida do alho. Por se tratar de uma revisão narrativa, a seleção das fontes não teve como finalidade produzir uma estimativa quantitativa combinada dos efeitos, mas construir uma síntese crítica das evidências disponíveis, dos mecanismos propostos e das limitações relacionadas à aplicação agrícola dessa alternativa.

As informações extraídas foram organizadas considerando autor e ano de publicação, espécie vegetal avaliada, parte do alho utilizada, natureza do material testado, método de extração, composição química, concentração, forma e momento de aplicação, duração do experimento e condições de cultivo. Quando disponíveis, também foram examinadas informações sobre a relação dose–efeito, a seletividade para espécies cultivadas, a persistência dos compostos no ambiente, a estabilidade das formulações, os efeitos sobre organismos não

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730
alvo e a integração dos derivados do alho com práticas culturais, mecânicas, físicas e químicas de manejo.

A comparação entre os trabalhos buscou identificar resultados convergentes, divergências e respostas dependentes do contexto, reconhecendo que a atividade alelopática pode variar conforme o genótipo e a origem do alho, a parte vegetal empregada, o armazenamento, o método de extração, a concentração, a formulação e a sensibilidade da espécie receptora. Também foram consideradas respostas neutras, estimulantes ou desfavoráveis, especialmente aquelas relacionadas à hormese, à ausência de seletividade, à fitotoxicidade para as culturas, à instabilidade e volatilidade dos compostos organossulfurados e à redução da eficácia em condições ambientais distintas das observadas em laboratório.

A síntese das evidências foi estruturada em quatro eixos temáticos: composição fitoquímica do alho e compostos associados à atividade alelopática; mecanismos de ação alelopática sobre a germinação e o desenvolvimento de plantas espontâneas; evidências experimentais do potencial bioherbicida de extratos e resíduos de alho; e aplicação do alho no manejo sustentável de plantas espontâneas, incluindo suas possibilidades e limitações. Essa organização permitiu integrar conhecimentos de fitoquímica, fisiologia vegetal, alelopatia e manejo de plantas espontâneas, oferecendo uma análise abrangente das condições necessárias para que o alho possa ser empregado como ferramenta complementar em programas de manejo integrado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição fitoquímica do alho e compostos associados à atividade alelopática

A busca por alternativas aos herbicidas sintéticos tem ampliado o interesse por espécies capazes de produzir metabólitos com atividade alelopática. Nesse contexto, o alho (*Allium sativum* L.) destaca-se pela elevada concentração de compostos organossulfurados biologicamente ativos, sobretudo alicina, sulfeto de dialila e dissulfeto de dialila. Esses compostos podem ser liberados por exsudação radicular, decomposição de resíduos, volatilização ou aplicação de extratos vegetais, interferindo na germinação e no desenvolvimento de plantas receptoras (Cheng; Cheng, 2016).

Ensaios com extrato aquoso de bulbos demonstraram redução do crescimento da parte aérea, do desenvolvimento radicular e da nodulação de leguminosas, com respostas mais intensas à medida que a concentração foi elevada (Adeleke *et al*., 2016). Os voláteis liberados pelo alho também alteram processos fisiológicos relacionados ao metabolismo de espécies

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

vizinhas, confirmando que sua ação não depende exclusivamente do contato direto entre os tecidos vegetais (Yang *et al*., 2019). Dessa forma, a atividade alelopática do alho o posiciona como fonte potencial de moléculas para o desenvolvimento de bioherbicidas vegetais (Khamare *et al*., 2022).

As evidências mais diretas dessa aplicação foram apresentadas para o capim-arroz (*Echinochloa crus-galli*), uma das principais plantas espontâneas de áreas orizícolas. Entre óleos essenciais de 12 espécies vegetais, o óleo essencial de alho apresentou a maior atividade inibitória, com EC_{50} de 0,0126 g mL^{-1} e aproximadamente 88% de inibição do crescimento do capim-arroz (Bai *et al*., 2023). A análise por cromatografia gasosa associada à espectrometria de massas identificou 20 constituintes, entre os quais o sulfeto de dialila e o dissulfeto de dialila demonstraram atividade herbicida individualmente (Bai *et al*., 2023).

A exposição ao óleo provocou elevação inicial das atividades de catalase, peroxidase e superóxido dismutase, seguida de redução acentuada dessas defesas antioxidantes, indicando desequilíbrio na homeostase das espécies reativas de oxigênio (Yang *et al*., 2019). Paralelamente, a diminuição do teor total de clorofila sugere comprometimento do aparato fotossintético, mecanismo frequentemente relacionado à ação de substâncias naturais fitotóxicas (Radhakrishnan *et al*., 2018).

A ação do alho, entretanto, apresenta caráter bifásico e dependente da dose. Em baixas concentrações, o dissulfeto de dialila pode estimular o crescimento radicular; em concentrações elevadas, reduz a germinação, a biomassa e a elongação das raízes (Cheng; Cheng, 2016). Esse comportamento está associado a alterações no índice mitótico, na concentração de auxinas e giberelinas e na expressão de genes envolvidos no transporte hormonal e na expansão da parede celular (Cheng; Cheng, 2016).

A elevada sensibilidade das raízes também decorre de seu contato direto com os aleloquímicos presentes na solução ou no solo, o que explica a redução acentuada do sistema radicular observada após a aplicação de extratos de alho (Adeleke *et al*., 2016). Além da dose, a resposta varia conforme a espécie receptora, o estádio de desenvolvimento, a parte do alho empregada e a forma de obtenção do extrato, evidenciando que resultados de laboratório não podem ser diretamente extrapolados para condições de campo (Scavo; Mauromicale, 2021).

No manejo sustentável, o potencial do alho pode ser explorado por meio de extratos aquosos, óleos essenciais, resíduos triturados ou formulações contendo seus compostos organossulfurados. Os extratos poderiam ser aplicados em pré-emergência para limitar a germinação e o estabelecimento inicial das plantas espontâneas, enquanto formulações concentradas do óleo essencial apresentam maior potencial para aplicações em pós-emergência

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

(Khamare *et al*., 2022). A seletividade observada entre o arroz e o capim-arroz indica uma possibilidade particularmente relevante para sistemas orizícolas, embora o óleo de alho também tenha reduzido parcialmente a biomassa de plântulas de arroz em determinadas doses (Bai *et al*., 2023). Consequentemente, sua utilização deve ser integrada a práticas como cobertura do solo, rotação de culturas, controle mecânico e aplicação localizada, evitando a exposição indiscriminada das culturas agrícolas (Kostina-Bednarz *et al*., 2023). Essa integração pode diminuir a pressão de seleção exercida pelos herbicidas convencionais e contribuir para o manejo de populações resistentes (Roberts *et al*., 2022).

Apesar dos resultados promissores, o emprego do alho como bioherbicida ainda se encontra predominantemente em fase experimental. A volatilidade e a rápida degradação dos compostos organossulfurados podem reduzir a persistência e produzir respostas inconsistentes sob variações de temperatura, radiação, umidade e propriedades do solo (Kostina-Bednarz *et al*., 2023). Também devem ser avaliados possíveis efeitos sobre culturas não alvo, microrganismos benéficos, germinação de espécies cultivadas e simbioses como a nodulação de leguminosas (Adeleke *et al*., 2016).

Tecnologias como nanoemulsões, encapsulamento e uso de adjuvantes podem aumentar a estabilidade e permitir a liberação controlada dos princípios ativos (Islam *et al*., 2024). Portanto, a consolidação do alho como ferramenta bioherbicida requer ensaios de campo, padronização química dos extratos, determinação de doses seletivas e estudos ecotoxicológicos; até que essas etapas sejam cumpridas, sua aplicação deve ser apresentada como componente potencial do manejo integrado, e não como substituto plenamente validado dos herbicidas sintéticos (Bai *et al*., 2023).

3.2 Mecanismos de ação alelopática sobre a germinação e o desenvolvimento de plantas espontâneas

O potencial alelopático do alho (*Allium sativum* L.) está relacionado principalmente à presença de compostos organossulfurados, como aliina, alicina, ajoeno, dissulfeto de dialila (DADS) e trissulfeto de dialila. Após o rompimento dos tecidos, a aliina entra em contato com a enzima aliinase, originando alicina, molécula instável que se converte rapidamente em outros sulfetos bioativos (Martins *et al.*, 2016). Esses compostos podem alcançar as sementes e plântulas por meio de extratos, resíduos vegetais, exsudatos radiculares ou compostos voláteis, interferindo em diferentes processos fisiológicos (Ding *et al.*, 2020).

Em bioensaios com capim-arroz (*Echinochloa crus-galli*), o óleo essencial de alho reduziu a germinação e o desenvolvimento inicial de maneira dependente da concentração,

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

demonstrando atividade fitotóxica sobre uma espécie espontânea de importância agrícola (Bai *et al.*, 2023). Entretanto, os efeitos não são necessariamente lineares, pois concentrações reduzidas podem estimular determinados processos, enquanto doses elevadas tendem a causar inibição acentuada, caracterizando uma resposta hormética (Cheng *et al.*, 2016).

Durante a germinação, os aleloquímicos podem comprometer a embebição, a integridade das membranas e a mobilização das reservas necessárias ao crescimento do embrião. A alicina apresenta elevada reatividade com grupos tiol de proteínas, podendo modificar enzimas que possuem resíduos de cisteína funcionalmente importantes e alterar processos metabólicos essenciais (Borlinghaus *et al.*, 2021). Essa propriedade sugere que concentrações fitotóxicas dos compostos do alho podem interferir na atuação de hidrolases, como α-amilase e proteases, reduzindo a conversão de amido e proteínas de reserva em açúcares e aminoácidos disponíveis ao eixo embrionário (Hayat *et al.*, 2020).

Alterações no metabolismo de carboidratos foram efetivamente observadas em plantas receptoras expostas aos exsudatos radiculares do alho, reforçando a existência de uma ação sobre a produção e a utilização de energia (Ding *et al.*, 2020). Como resultado, podem ocorrer atraso da protrusão da radícula, diminuição da velocidade e do índice de germinação e menor estabelecimento das plântulas, efeitos registrados em sementes expostas a concentrações elevadas de DADS ou óleo essencial de alho (Cheng *et al.*, 2016; Bai *et al.*, 2023).

Após a emergência, o sistema radicular constitui um dos principais alvos da ação alelopática, devido ao contato direto com os compostos presentes na solução do solo. O DADS modifica a atividade mitótica das células meristemáticas e altera a frequência das fases do ciclo celular, restringindo a formação de novas células quando presente em concentrações elevadas (Cheng *et al.*, 2016). Em pepino, esse composto também regulou genes associados ao ciclo celular e modificou os níveis de auxinas, citocininas e giberelinas, demonstrando que a redução do crescimento radicular envolve simultaneamente alterações hormonais e citológicas (Ren *et al.*, 2018).

A expressão de genes que codificam expansinas, proteínas responsáveis pelo afrouxamento da parede celular, também pode ser desregulada, limitando o alongamento das células e a expansão da raiz (Cheng *et al.*, 2016). Consequentemente, observam-se raízes menores, redução da densidade de pelos radiculares e menor superfície de exploração do solo, características que restringem a absorção de água e nutrientes (Hayat *et al.*, 2020). Em plantas espontâneas, essa limitação pode diminuir rapidamente a capacidade competitiva e aumentar a mortalidade durante os estádios iniciais de desenvolvimento (Bai *et al.*, 2023).

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

A deterioração da estrutura radicular repercute na nutrição mineral e no metabolismo da parte aérea. A redução dos pelos absorventes e as alterações na permeabilidade das membranas podem comprometer o transporte de íons, a manutenção dos gradientes eletroquímicos e a absorção de nutrientes essenciais (Ren *et al.*, 2018). Além disso, compostos derivados da alicina podem interagir com proteínas de membrana e modificar sua funcionalidade, afetando processos de transporte e homeostase celular (Borlinghaus *et al.*, 2021). Sob elevada exposição aos exsudatos do alho, foram registradas reduções no teor de clorofilas e na produção de biomassa, indicando prejuízos à formação e à estabilidade do aparato fotossintético (Ding *et al.*, 2016).

A menor disponibilidade de nutrientes, especialmente nitrogênio, magnésio e ferro, pode intensificar a degradação dos pigmentos e reduzir a eficiência fotoquímica, enquanto o comprometimento estomático limita a assimilação de CO_2. Embora doses baixas de extrato ou DADS possam aumentar a clorofila e estimular o metabolismo de algumas plantas cultivadas, concentrações elevadas produzem respostas inibitórias, aspecto fundamental para sua utilização seletiva como bioherbicida (Ali *et al.*, 2019; Hayat *et al.*, 2020).

Outro mecanismo central envolve o desequilíbrio oxidativo. A exposição aos compostos organossulfurados pode aumentar a produção de espécies reativas de oxigênio, como o radical superóxido e o peróxido de hidrogênio, promovendo oxidação de proteínas, peroxidação lipídica e perda da seletividade das membranas (Hayat *et al.*, 2020). Inicialmente, a planta-alvo pode elevar a atividade de enzimas antioxidantes, incluindo superóxido dismutase, catalase, peroxidase e ascorbato-peroxidase, como resposta de defesa ao estresse químico (Ali *et al.*, 2019). Quando a concentração dos aleloquímicos supera a capacidade de desintoxicação, porém, ocorre acúmulo de malondialdeído, extravasamento de eletrólitos e redução da viabilidade celular (Ding *et al.*, 2016).

Essa condição agrava a inibição da germinação, do crescimento radicular e da fotossíntese, produzindo um efeito integrado sobre o estabelecimento das plantas espontâneas (Bai *et al.*, 2023). Assim, a ação bioherbicida do alho não decorre de um único sítio bioquímico, mas da combinação entre alterações enzimáticas, hormonais, mitóticas, nutricionais, fotossintéticas e oxidativas, cuja intensidade depende da concentração, da formulação e da sensibilidade da espécie-alvo.

3.3 Evidências Experimentais Do Potencial Bioherbicida De Extratos E Resíduos De Alho

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

As evidências experimentais recentes sobre o emprego direto do alho (*Allium sativum* L.) como bioherbicida ainda são limitadas e concentram-se principalmente em bioensaios de laboratório. Em uma das avaliações mais diretamente relacionadas ao controle de plantas espontâneas, Saraiva (2019) testou extrato aquoso e óleo essencial de alho sobre *Medicago minima*, *Rumex crispus* e *Taraxacum officinale*. O extrato foi preparado pela maceração de 20 g de material vegetal triturado em 100 mL de água destilada, durante 24 horas, enquanto o óleo essencial foi avaliado em diferentes concentrações. Os extratos aquosos apresentaram maior atividade em pré-emergência, sobretudo pela redução da germinação de *T. officinale*, demonstrando que compostos hidrossolúveis do bulbo podem atuar antes do estabelecimento da plântula (Saraiva, 2019).

Esse resultado é coerente com a predominância de compostos organossulfurados biologicamente ativos nos bulbos de alho (Batiha *et al*., 2020) e com a reconhecida capacidade dos extratos vegetais de interferir na germinação e no crescimento inicial das plantas-alvo (Khamare *et al*., 2022). Entretanto, a eficiência dos produtos botânicos depende da espécie receptora, do solvente e da concentração utilizada, o que dificulta extrapolar os resultados de um único bioensaio para diferentes comunidades infestantes (Kostina-Bednarz *et al*., 2023).

Nos ensaios de pós-emergência, o óleo essencial de alho aplicado a 7,5% provocou sintomas visuais de injúria em plântulas de *T. officinale*, enquanto o extrato aquoso apresentou menor efeito sobre plantas já estabelecidas e não ocasionou redução significativa da concentração de clorofila nas folhas remanescentes após 24 horas (Saraiva, 2019). Essa diferença indica que a forma de extração determina o perfil químico e, consequentemente, a atividade herbicida: a maceração em água favorece compostos polares, ao passo que o óleo essencial concentra sulfetos voláteis, particularmente dissulfeto de dialila, trissulfeto de dialila e outros derivados sulfurados (Bar *et al*., 2022).

A maior resposta obtida com concentrações elevadas também evidencia uma relação dose–efeito característica dos aleloquímicos, cuja atuação pode variar de estimulação em doses baixas a forte inibição em doses superiores (Ding *et al*., 2016). Em compostos isolados do alho, Ren *et al*. (2018) verificaram que o dissulfeto de dialila alterou o crescimento radicular, os níveis hormonais e a progressão do ciclo celular, oferecendo sustentação fisiológica para as reduções de germinação e desenvolvimento observadas nos bioensaios com extratos integrais.

Experimentos conduzidos com espécies cultivadas reforçam essa dependência da resposta em relação à dose e ajudam a interpretar os possíveis efeitos sobre plantas espontâneas. Em cocultivo hidropônico, concentrações baixas de exsudatos radiculares de alho estimularam

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

características fisiológicas da pimenta, enquanto níveis elevados comprometeram o crescimento, a fotossíntese e o equilíbrio antioxidativo (Ding *et al*., 2016).

De modo semelhante, o dissulfeto de dialila modificou a divisão e o alongamento celular das raízes de pepino de maneira dependente da concentração (Ren *et al*., 2018). A caracterização química de extratos de alho-verde também identificou compostos com atividade alelopática, embora sua intensidade tenha variado conforme a substância e a espécie receptora (Yang *et al*., 2019). Portanto, as respostas obtidas com *T. officinale*, pimenta e pepino mostram que a sensibilidade não é uniforme e que a seleção de doses herbicidas deve considerar simultaneamente o controle da planta espontânea e a seletividade para a cultura agrícola (Khamare *et al*., 2022).

Em relação aos resíduos de alho incorporados ao solo, a literatura da última década apresenta evidências muito mais escassas do que aquelas disponíveis para extratos, óleos essenciais e compostos isolados. Embora folhas, hastes, raízes e resíduos da industrialização possam liberar aleloquímicos durante a decomposição, sua atividade depende da quantidade incorporada, da umidade, da microbiota e da velocidade de degradação no solo (Khamare *et al*., 2022). A instabilidade dos compostos sulfurados e sua transformação rápida após o rompimento dos tecidos também podem explicar diferenças entre resultados laboratoriais e respostas obtidas em substratos ou solos (Bar *et al*., 2022).

Revisões recentes ressaltam que a eficácia demonstrada em placas de Petri geralmente diminui sob condições ambientais variáveis, em razão da adsorção, volatilização, lixiviação e degradação microbiana dos aleloquímicos (Kostina-Bednarz *et al*., 2023). Assim, apesar dos resultados promissores em pré e pós-emergência (Saraiva, 2019), não foram localizados, no período analisado, ensaios de campo publicados em periódicos que comprovem controle consistente de plantas espontâneas por extratos ou resíduos de *A. sativum*. O potencial bioherbicida do alho deve, portanto, ser considerado experimental, demandando estudos de casa de vegetação e campo com curvas dose–resposta, diferentes espécies infestantes, avaliação de seletividade, persistência no solo e comparação com herbicidas comerciais.

3.4 Aplicação do alho no manejo sustentável de plantas espontâneas: possibilidades e limitações

O alho (*Allium sativum* L.) apresenta potencial para integrar programas sustentáveis de manejo de plantas espontâneas, principalmente na forma de extratos aquosos e óleo essencial. Os extratos podem ser obtidos pela trituração de bulbos frescos em água, seguida de filtração e aplicação ao solo ou à parte aérea das plantas, constituindo uma alternativa tecnicamente

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

simples para pequenas propriedades. Entretanto, sua eficiência depende da concentração, da parte vegetal utilizada e do estádio de desenvolvimento da espécie-alvo, pois respostas estimulantes em doses baixas e inibitórias em doses elevadas podem ocorrer (Adeleke, 2016). O óleo essencial de alho apresenta atividade mais concentrada, associada especialmente ao sulfeto de dialila e ao dissulfeto de dialila (Bai *et al.*, 2023), enquanto os compostos voláteis liberados pelos tecidos verdes também podem alterar o equilíbrio oxidativo das plantas expostas (Yang *et al.*, 2019). Apesar dessas possibilidades, extratos brutos geralmente apresentam composição variável e menor estabilidade, condição que dificulta a reprodução dos resultados entre lotes e ambientes de aplicação (Khamare *et al.*, 2022).

A incorporação de folhas, pseudocaules, cascas e bulbos descartados ao solo representa outra possibilidade de aproveitamento do alho, especialmente em regiões produtoras onde esses resíduos estão disponíveis. Durante a decomposição, os compostos aleloquímicos podem ser liberados na solução do solo, enquanto o emprego do material como cobertura morta também limita fisicamente a emergência e reduz a disponibilidade de luz para as plantas espontâneas (Khamare *et al.*, 2022). Essa estratégia, contudo, exige cautela, uma vez que a concentração efetivamente liberada depende da quantidade de biomassa, do grau de trituração, da umidade, da temperatura e da atividade microbiana do solo (Scavo; Mauromicale, 2021).

Além disso, a aplicação de extrato de alho ao solo reduziu o crescimento radicular e a nodulação de feijão-caupi e amendoim, com agravamento dos efeitos nas maiores concentrações, evidenciando riscos para culturas leguminosas e para microrganismos simbióticos (Adeleke, 2016). Portanto, resíduos e coberturas contendo alho devem ser avaliados quanto à dose, ao período entre incorporação e semeadura e à sensibilidade da cultura sucessora, pois a origem vegetal do produto não garante seletividade ou ausência de efeitos não alvo (Bai *et al.*, 2023).

A elevada volatilidade, a baixa solubilidade em água e a rápida degradação dos compostos sulfurados constituem obstáculos importantes para o emprego do óleo de alho em condições de campo. Luz, temperatura, oxigênio, chuva e propriedades do solo podem reduzir sua persistência e tornar o controle menos uniforme do que aquele observado em bioensaios laboratoriais (Vasconcelos *et al.*, 2025). Formulações emulsificadas, microencapsuladas ou nanoencapsuladas podem proteger os princípios ativos, melhorar a dispersão em água e proporcionar liberação gradual, ampliando o tempo de contato com as plantas-alvo (Rodríguez-Mejías *et al.*, 2023).

Sistemas biodegradáveis também podem reduzir a quantidade necessária do produto e melhorar sua retenção e direcionamento no ambiente (Jayasoorya *et al.*, 2024). Todavia, ainda

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

não estão disponíveis evidências suficientes para afirmar que formulações encapsuladas especificamente com óleo ou extratos de alho sejam eficientes e seguras em escala comercial. Antes de sua recomendação, são necessários estudos sobre cinética de liberação, resíduos, transporte no solo, toxicidade para organismos edáficos e aquáticos e comportamento dos materiais carreadores (Rodríguez-Mejías *et al.*, 2023).

A seletividade representa uma das principais limitações agronômicas. Embora o óleo essencial de alho tenha provocado aproximadamente 88% de inibição do crescimento de *Echinochloa crus-galli* e apresentado menor efeito sobre a germinação do arroz, doses mais elevadas também reduziram a biomassa das plântulas da cultura (Bai *et al.*, 2023). De modo semelhante, a fitotoxicidade observada em culturas leguminosas confirma que aplicações não direcionadas podem prejudicar o estabelecimento, o sistema radicular e as associações com rizóbios (Adeleke, 2016). A padronização deverá considerar genótipo, origem e armazenamento do alho, método de extração, composição química, concentração, adjuvantes e momento de aplicação, fatores decisivos para transformar um extrato variável em produto agrícola reprodutível (Yang *et al.*, 2019).

A viabilidade econômica dependerá do aproveitamento de resíduos agroindustriais, da disponibilidade local da matéria-prima e do custo das formulações, especialmente das tecnologias de encapsulação (Jayasoorya *et al.*, 2024). Assim, o alho deve ser considerado componente complementar do manejo integrado, associado à cobertura do solo, rotação de culturas, controle mecânico, redução do banco de sementes e aplicações localizadas, e não como substituto isolado dos demais métodos de controle (Khamare *et al.*, 2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As evidências analisadas demonstram que o alho (*Allium sativum* L.) apresenta potencial como fonte de compostos naturais com atividade bioherbicida, principalmente em razão da presença de metabólitos organossulfurados capazes de interferir em diferentes processos fisiológicos e bioquímicos das plantas. Extratos aquosos, óleos essenciais, exsudatos e compostos derivados do alho podem afetar a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas receptoras, com efeitos sobre a divisão e o alongamento celular, o equilíbrio hormonal, a absorção de nutrientes, a atividade fotossintética e o metabolismo oxidativo.

A intensidade dessas respostas, entretanto, é fortemente dependente da concentração, da forma de obtenção e aplicação do produto e da sensibilidade da espécie receptora. A ocorrência de respostas horméticas, com estímulo em baixas concentrações e inibição em doses mais elevadas, evidencia a necessidade de estabelecer faixas de aplicação capazes de

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

proporcionar controle das plantas espontâneas sem causar danos às culturas. A fitotoxicidade observada em espécies cultivadas reforça que a origem natural dos compostos não implica, necessariamente, seletividade ou segurança agronômica.

Embora os resultados experimentais indicam potencial para utilização de extratos e, principalmente, do óleo essencial de alho no manejo de plantas espontâneas, a maior parte das evidências disponíveis ainda provém de condições controladas. A volatilidade, a instabilidade e a rápida degradação dos compostos organossulfurados podem reduzir sua persistência e eficácia em condições de campo. Além disso, permanecem lacunas relacionadas à padronização química das formulações, à seletividade para diferentes culturas, aos efeitos sobre organismos não alvo e à viabilidade econômica de sua utilização em escala agrícola.

Tecnologias de formulação, como emulsificação, microencapsulamento e nanoencapsulamento, apresentam perspectivas para aumentar a estabilidade, melhorar a dispersão e promover a liberação gradual dos compostos ativos. Entretanto, sua aplicação específica aos derivados do alho ainda necessita de validação quanto à eficácia agronômica, segurança ambiental e viabilidade econômica. Da mesma forma, o aproveitamento de resíduos provenientes da produção e do processamento do alho constitui uma possibilidade relevante, mas requer estudos que determinem doses, formas de aplicação e períodos seguros entre a incorporação dos resíduos e o estabelecimento das culturas.

Dessa forma, o alho deve ser considerado uma fonte promissora de moléculas e produtos naturais para o desenvolvimento de bioherbicidas e uma ferramenta potencialmente complementar ao manejo integrado de plantas espontâneas, e não um substituto plenamente estabelecido dos herbicidas convencionais. A consolidação dessa alternativa depende, principalmente, da realização de ensaios em condições de campo, da construção de curvas de dose–resposta para diferentes espécies espontâneas e cultivadas, da definição de doses seletivas, da avaliação da persistência dos compostos no ambiente e de estudos ecotoxicológicos e econômicos. O avanço dessas pesquisas poderá contribuir para transformar o potencial alelopático do alho em estratégias de manejo mais eficientes, seletivas e ambientalmente compatíveis com sistemas agrícolas sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ADELEKE, Martina T. V.; EZEABASILI, S. I.; ESEIGBE, D. A. Effect of Allium sativum (garlic) extract on the growth and nodulation of cowpea (Vigna unguiculata) and groundnut (Arachis hypogaea). African Journal of Agricultural Research, v. 11, n. 43, p. 4304–4312, 2016. DOI: https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11208.

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

ALI, M.; CHENG, Z. H.; HAYAT, S.; AHMAD, H.; GHANI, M. I.; LIU, T. Foliar spraying of aqueous garlic bulb extract stimulates growth and antioxidant enzyme activity in eggplant (Solanum melongena L.). Journal of Integrative Agriculture, v. 18, p. 1001–1013, 2019.

BAI, Haodong; NI, Xianzhi; HAN, Jincai; LUO, Dingfeng; HU, Yihong; JIN, Chenzhong; LI, Zuren. Phytochemical profiling and allelopathic effect of garlic essential oil on barnyard grass (Echinochloa crus-galli L.). PLOS ONE, v. 18, n. 4, e0272842, 2023. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272842.

BAR, M.; BINDUGA, U. E.; SZCZEPANIAK, M. Methods of isolation of active substances from garlic (Allium sativum L.) and its impact on the composition and biological properties of garlic extracts. Antioxidants, v. 11, n. 7, art. 1345, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox11071345.

BATIHA, G. E.-S. et al. Chemical constituents and pharmacological activities of garlic (Allium sativum L.): a review. Nutrients, v. 12, n. 3, art. 872, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/nu12030872.

BORLINGHAUS, J.; ALBRECHT, F.; GRUHLKE, M. C. H.; NWACHUKWU, I. D.; SLUSARENKO, A. J. Allicin: chemistry and biological properties.. Molecules, v. 26, n. 6, art. 1505, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules26061505.

CHENG, Fang; CHENG, Zhihui; MENG, H.; TANG, X. The garlic allelochemical diallyl disulfide affects tomato root growth by influencing cell division, phytohormone balance and expansin gene expression. Frontiers in Plant Science, v. 7, art. 1199, 2016. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01199.

DING, H.; ALI, A.; CHENG, Z. An allelopathic role for garlic root exudates in the regulation of carbohydrate metabolism in cucumber in a hydroponic co-culture system. Plants, v. 9, n. 1, art. 45, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/plants9010045.

DING, H.; CHENG, Z.; LIU, M.; HAYAT, S.; FENG, H. Garlic exerts allelopathic effects on pepper physiology in a hydroponic co-culture system. Biology Open, v. 5, n. 5, p. 631–637, 2016. DOI: https://doi.org/10.1242/bio.016451.

HAYAT, S.; AHMAD, H.; NASIR, M.; KHAN, M. N.; ALI, M.; HAYAT, K.; KHAN, F.; ALI, Q.; CHENG, Z. Some physiological and biochemical mechanisms during seed-to-seedling transition in tomato as influenced by garlic allelochemicals. Antioxidants, v. 9, n. 3, art. 235, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox9030235.

ISLAM, A. K. M. M. et al. Unlocking the potential of bioherbicides for sustainable and environmentally friendly weed management. Heliyon, v. 10, 2024.

JAYASOORYA, R. et al. Utilization of biodegradable carrier-based nano herbicide formulations for sustainable weed management in agriculture. Frontiers in Agronomy, v. 6, art. 1497041, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1497041.

KHAMARE, Yuvraj; CHEN, J.; MARBLE, S. Christopher; QURESHI, J.; KOSTENYUK, I. Allelopathy and its application as a weed management tool: a review. Frontiers in Plant Science, v. 13, art. 1034649, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034649.

ISBN: 978-65-831-2134-9 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963730

KOSTINA-BEDNARZ, M.; PŁONKA, J.; BARCHANSKA, H. Allelopathy as a source of bioherbicides: challenges and prospects for sustainable agriculture. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v. 22, p. 471–504, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11157-023-09656-1.

MARTINS, N.; PETROPOULOS, S.; FERREIRA, I. C. F. R. Chemical composition and bioactive compounds of garlic (Allium sativum L.) as affected by pre- and post-harvest conditions: a review. Food Chemistry, v. 211, p. 41–50, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.029.

RADHAKRISHNAN, Ramalingam; ALQARAWI, Abdulaziz A.; ABD_ALLAH, Elsayed F. Bioherbicides: current knowledge on weed control mechanism. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 158, p. 131–138, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.018.

REN, K.; HAYAT, S.; QI, X.; LIU, T.; CHENG, Z. The garlic allelochemical DADS influences cucumber root growth involved in regulating hormone levels and modulating cell cycling. Journal of Plant Physiology, v. 230, p. 51–60, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.08.007.

ROBERTS, Jonathan; FLINTAN, F.; GILLON, K. et al. Achievements, developments and future challenges in the field of bioherbicides for weed control: a global review. Plants, v. 11, n. 17, art. 2242, 2022.

RODRÍGUEZ-MEJÍAS, Francisco J.; SCAVO, Aurelio; CHINCHILLA, Nuria; MOLINILLO, José M. G.; SCHWAIGER, Stefan; MAUROMICALE, Giovanni; MACÍAS, Francisco A. Perspectives and advances in organic formulations for agriculture: encapsulation of herbicides for weed control. Agronomy, v. 13, n. 7, art. 1898, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13071898.

SARAIVA, C. S. S. Bioherbicidal effect of plant aqueous extracts and essential oils. 2019. Dissertação (Mestrado em Agricultura Biológica) – Escola Superior Agrária de Coimbra, Coimbra, 2019.

SCAVO, Aurelio; MAUROMICALE, Giovanni. Crop allelopathy for sustainable weed management in agroecosystems: knowing the present with a view to the future. Agronomy, v. 11, n. 11, art. 2104, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy11112104.

VASCONCELOS, L. C. et al. Bioherbicidal and cytogenotoxic potential of nanoemulsions containing essential oils from Piper amalago and Piper dilatatum. Scientific Reports, v. 15, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-18224-2.

YANG, Fan; LIU, Xiaoxue; WANG, Hui; DENG, Rui; YU, Hanhan; CHENG, Zhihui. Identification and allelopathy of green garlic (Allium sativum L.) volatiles on scavenging of cucumber (Cucumis sativus L.) reactive oxygen species. Molecules, v. 24, n. 18, art. 3263, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules24183263