



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE
QUEIROZ”
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROJETANDO AGRICULTURA COMPROMISSADA EM
SUSTENTABILIDADE

Herbicidas inibidores dos fotossistemas II e I

SUMÁRIO

HERBICIDAS INIBIDORES DO FOTOSSISTEMA II

1 INTRODUÇÃO.....	5
2 MODO DE AÇÃO.....	7
3 SINTOMAS.....	9
4 PRINCIPAIS HERBICIDAS.....	10
4.1 METRIBUZIN.....	10
4.2 ATRAZINA.....	11
4.3 BENTAZONA.....	12
4.4 DIURON.....	12
5 SINERGISMOS COM OUTROS MECANISMOS DE AÇÃO.....	14
5.1 INTERAÇÃO ENTRE CLETHODIM, DIQUAT E DIURON.....	14
5.2 INTERAÇÃO ENTRE CLOMAZONE E METRIBUZIN.....	15
6 RESISTÊNCIA.....	17
6.1 CASOS RECENTES DE RESISTÊNCIA.....	17
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	19
REFERÊNCIAS.....	20

HERBICIDAS INIBIDORES DO FOTOSSISTEMA I

1 INTRODUÇÃO.....	23
2 REAÇÕES FOTOQUÍMICAS DA FOTOSSÍNTESE.....	24
3 INIBIDORES DO FOTOSSISTEMA I.....	26
4 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	31
5 PRODUTOS E SINTOMATOLOGIA.....	33
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
REFERÊNCIAS.....	37



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE
QUEIROZ”
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROJETANDO AGRICULTURA COMPROMISSADA EM
SUSTENTABILIDADE

André Zanini Pimentel
Raul Accari

Herbicidas: Inibidores do fotossistema II

Piracicaba - SP
Março - 2025

ANDRÉ ZANINI PIMENTEL
RAUL ACCARI

Herbicidas inibidores do fotossistema II

Revisão bibliográfica apresentada ao grupo **Projetando Agricultura Compromissada em Sustentabilidade**, vinculado ao Departamento de Ciências do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, para o processo seletivo de Verão 2025.

Orientadores: Prof. Dr. Fernando Dini Andreote e Prof. Dr. Moacir Tuzzin de Moraes.

Coordenadores: Benjamin Clemente Marinho e Ricardo Fuchs.

Piracicaba - SP
Março - 2025

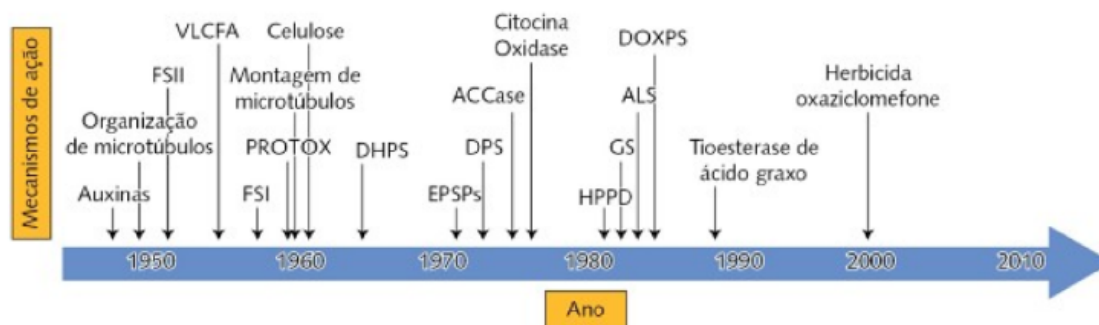
1 INTRODUÇÃO

Os herbicidas são moléculas químicas que são capazes de selecionar uma população de plantas desejada. “Seleção” nesse contexto se refere à atuação desses produtos na seleção de uma população específica, matando certas plantas e outras não. Portanto, quando se diz que um herbicida é seletivo para plantas de folha larga, significa que ele não irá matar as daninhas de folha larga (Oliveira Junior; Constantin; Inoue, 2011).

O estudo sobre o controle de plantas daninhas vem de uma longa história com relatos a partir do século XX, por volta de 1908, por exemplo, quando alguns pesquisadores usaram sais de cobre e depois ácido sulfúrico para o controle de plantas daninhas. Trazendo para um passado um pouco mais recente, pode-se destacar o evento marcante, que aconteceu em 1941 durante a Segunda Guerra Mundial, a criação do ácido 2,4-diclorofenóxiacético, mais conhecido como 2,4-D. Durante esse período da história foram descobertas as propriedades dos derivados dos ácidos fenoxiacéticos como agentes importantes no controle de plantas daninhas (Oliveira Junior; Constantin; Inoue, 2011; Pokorny, 1941).

Depois da descoberta do 2,4-D na época da Segunda Guerra, diversos produtos com mecanismos de ação diferentes surgiram ao longo dos anos, e apesar de o último mecanismo de ação importante ter sido lançado a mais de 30 anos, as descobertas não pararam (Figura 1.1). Pelo menos 14 novos locais-alvo para herbicidas foram descobertos nesse período, porém nenhum produto comercial foi desenvolvido para esses locais-alvo (Mendes; Silva, 2022).

Figura 1.1 - Ano de introdução no mercado do primeiro produto com determinado mecanismo de ação



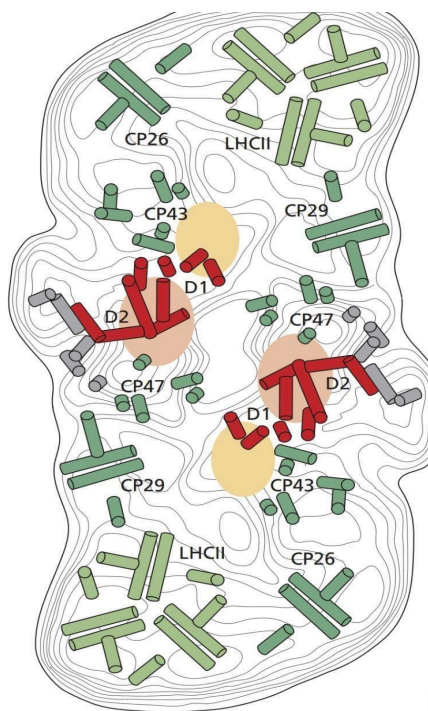
Fonte: Mendes e Silva (2022).

Os inibidores do fotossistema II são um mecanismo de ação de grande importância que foi desenvolvido na década de 1950 e que ainda é bastante relevância no manejo de plantas daninhas. Esses herbicidas são aplicados no solo e absorvidos pelas raízes das plantas daninhas e translocados por fluxo de massa no xilema. As plantas daninhas sob aplicação desses herbicidas irão germinar e emergir, porém, ao iniciarem a absorção radicular, irão translocar o produto para as folhas inibindo assim o fotossistema, o que acarreta a morte das plantas. São herbicidas muito importantes para a agricultura visto que podem ser usados em diversas culturas de grande interesse econômico como arroz, milho, feijão, cana-de-açúcar, soja, algodão, fruteiras, hortaliças, entre outras (Mendes; Silva, 2022).

2 MODO DE AÇÃO

O fotossistema II é localizado em um supercomplexo proteico com diversas subdivisões (Figura 2.1). Nas plantas superiores existem dois centros de reação com os núcleos de reação constituídos por proteínas de membrana D1 e D2, com outras proteínas do complexo antena. Esses núcleos de reação são ligados à plastoquinona e são responsáveis pela transferência dos elétrons entre as plastoquinonas A e B, o que proporciona a continuidade da transferência de elétrons para um complexo de citocromos que levará os elétrons para o fotossistema I, via plastocianina (Taiz; Zeiger, 2017).

Figura 2.1 - Supercomplexo protéico do fotossistema II

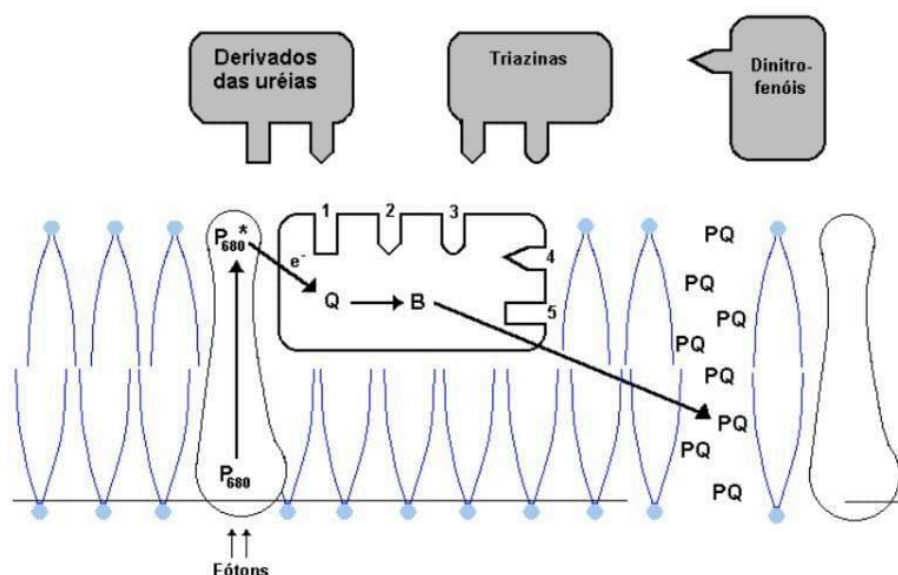


Fonte: Taiz e Zeiger (2017).

Todos os herbicidas desse grupo funcionam interrompendo a fotossíntese, no entanto existem três diferentes sítios de ligação da proteína D1: C1, C2 e C3, como se dispõe na figura 2.2. Os herbicidas que se ligam a C1 e C2 são usados em aplicações pós-emergência ou no solo, sendo translocados apenas no xilema. Alguns exemplos são: fenilcarbamatos, piridazinonas, triazinas, triazinonas,

triazolinonas e uracilas (C1); amidas e ureias (C2). Já os herbicidas do grupo C3 são de contato, ou seja, não podem ser usados em pré-emergência pois não são translocados na planta. Exemplos: benzotiadiazinonas, nitrilas e fenilpiridazinas. Também existem os inibidores chamados de “não clássicos”, constituídos pelos dinitrofenóis (piridazinonas e quinolinas), no entanto, é considerado que a ação sobre a fotossíntese destes herbicidas seja um efeito secundário (Oliveira Junior; Constantin; Inoue, 2011; Marchi *et al.*, 2008).

Figura 2.2 - Locais de ação na proteína D1 dos diferentes herbicidas inibidores do FSII



Fonte:Oliveira Junior *et al.* (2011).

Os herbicidas das famílias das triazinas, ureias e uracilas também conseguem se ligar no mesmo local da quinona QB. Em decorrência da obstrução da ligação, o fluxo de elétrons no fotossistema II é interrompido enquanto as moléculas de clorofila continuam a função de captar a energia solar, proporcionando um acúmulo de carga energética acentuada na clorofila, o que leva a formação de radicais livres. Assim, a morte das plantas é causada pela peroxidação de lipídios da membrana das células (Marchi *et al.*, 2008).

3 SINTOMAS

Os sintomas da aplicação dos herbicidas inibidores do fotossistema II se desenvolvem de maneira bem lenta, em vários dias de duração. É iniciado por uma clorose em função da destruição da clorofila, seguida por necrose decorrente da destruição das membranas pela peroxidação dos lipídios (Figuras 3.1 e 3.2). Esses sintomas se desenvolvem mais rápido em calor úmido (Marchi *et al.* 2008).

Figura 3.1 - Sintomas do fotossistema II



Fonte: Marchi *et al.* (2008).

Figura 3.2 - Sintomas de inibidores de fotossistema II



Fonte: Marchi *et al.* (2008).

4 PRINCIPAIS HERBICIDAS

O HRAC (Comitê de Ação a Resistência aos Herbicidas) classifica os herbicidas em grupos com letras e números a depender do mecanismo de ação. Os herbicidas inibidores do fotossistema II recebem a letra C, e dentro desse grupo existem 3 subgrupos (C1, C2 e C3), como se dispõe na tabela 4.1. O que determina esses subgrupos é o sítio de ligação dos herbicidas na proteína D1 (Oliveira Junior; Constantin; Inoue, 2011).

Tabela 4.1 - Grupos químicos associados a cada subgrupo

Subgrupos	Grupos Químicos
C1	Fenilcarbamatos, Piridazinonas, Triazinas, Triazinonas, Triazolinonas e Uracilas
C2	Amidas e Ureias
C3	Benzotiadiazinonas, Nitrilas e Fenilpiridazinas

Fonte: adaptado de Oliveira *et al.* (2011).

Dentre esses muitos grupos químicos, cumpre destacar alguns produtos que são famosos e de grande relevância dentro desse mecanismo de ação.

4.1 METRIBUZIN

O metribuzin está no subgrupo C1, fazendo parte do grupo químico das triazinonas. Ele é um herbicida seletivo que controla plantas daninhas de folha larga. Não há registro de casos de resistência aqui no Brasil. Em relação a sua seletividade, Correia e Carvalho (2018) concluíram em um estudo que o metribuzin é um herbicida seletivo para a cultura da cenoura, não causando depreciação da qualidade das raízes.

Dentre alguns produtos comerciais com esse ingrediente ativo, destacam-se alguns na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Produtos comerciais que contêm metribuzin

Ingrediente ativo	Produto comercial	Culturas selecionadas
Metribuzin+Indaziflam	Alion Pro	Cana-de-açúcar
Metribuzin	Sencor	Batata, Café, Cana-de-açúcar, Mandioca, Trigo, Tomate, Soja
Metribuzin+S-metolacoloro	Boundary	Amendoim, Batata, Café, Citros, Soja, Tomate

Fonte: Bula Alion Pro, Sencor e Boundary [s.d.].

4.2 ATRAZINA

A atrazina é classificada como sendo integrante do subgrupo C1 também, porém do grupo químico das triazinas. É um herbicida de baixo custo o que aumenta muito a sua adesão dentro do cronograma de aplicação dos produtores. Segundo o IBAMA (2022), a atrazina foi o terceiro ingrediente ativo mais utilizado no Brasil. Porém a atrazina apresenta toxicidade crônica, além de problemáticas ambientais relacionada a contaminação de corpos d'água superficiais e subterrâneos, isso devido a sua lenta degradação e suas características recalcitrantes (Hansen, 2013).

Dentre alguns produtos comerciais com esse ingrediente ativo, destacam-se alguns na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Produtos comerciais que contêm atrazina

Ingrediente ativo	Produto comercial	Culturas selecionadas
Atrazina, mesotriona e S-metolacoloro	Snooker	Cana-de-açúcar e milho
Atrazina	Antera	Milho, Sorgo e Cana
Atrazina	Gesaprim	Cana de açúcar, milho e sorgo

Fonte: Bula Snooker, Antera e Gesaprim [s.d.].

4.3 BENTAZONA

A bentazona é um herbicida de contato classificado como integrante do subgrupo C3 e pertencente ao grupo químico das tiadiazinas. Por não ser translocado na planta, é utilizado em pós-emergência, e a sua aplicação é recomendada no início do desenvolvimento da daninha com até 6 folhas desenvolvidas, sendo absorvido pelas folhas e em menor intensidade nas raízes. A sua persistência no ambiente é curta, não é adsorvido às partículas do solo e praticamente não é lixiviado (Almeida; Rodrigues, 1985).

Dentre alguns produtos comerciais com esse ingrediente ativo, destacam-se alguns na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Produtos comerciais que contêm bentazona

Ingrediente ativo	Produto comercial	Culturas selecionadas
Bentazona	Basagran 600	Soja, Aveia e Cevada
Bentazona, Imazamoxi	Amplo	Arroz, Amendoim e Feijão
Bentazona	Basagran 480	Milho, Soja e Feijão

Fonte: Bula Basagran 600, Basagran 480 e Amplo [s.d.].

4.4 DIURON

O diuron é um herbicida controlador de folha larga e gramíneas anuais usado em pré e pós-emergência precoce, pertencente ao subgrupo C2, e ao grupo químico dos derivados de ureia. Em pós-emergência é recomendado não aplicar com clima seco e presença de estresse hídrico na cultura. A adsorção do herbicida no solo pode ser acentuada pelo teor de argila, principalmente as com alta capacidade de troca, e matéria orgânica. A lixiviação, em contrapartida, é maior em solos arenosos e não é um fator significativo do desaparecimento do herbicida no solo. Nos cafezais é comum sua aplicação após operações de arruação e esparramação, junto de outros herbicidas residuais, como o 2,4-D, por exemplo (Almeida; Rodrigues, 1985).

Dentre alguns produtos comerciais com esse ingrediente ativo, destacam-se alguns na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Produtos comerciais que contêm diuron

Ingrediente ativo	Produto comercial	Culturas selecionadas
Diuron	Diuron Nortox 500SC	Algodão, Café e Cana
Diuron	Diuron 500SC Rainbow	Algodão, Café e Cana
Diuron	Herburon 500 BR	Algodão, Café e Citros

Fonte: Bula Diuron Nortox 500SC, Diuron 500SC Rainbow e Herburon 500 BR [s.d.].

5 SINERGISMOS COM OUTROS MECANISMOS DE AÇÃO

Os herbicidas, ao serem misturados na calda de pulverização, ou na própria formulação do produto, podem gerar efeitos diversos, sejam eles sinérgicos, antagônicos ou aditivos. São diversas as vantagens de se fazer misturas entre herbicidas, dentre eles estão (Carvalho, 2013):

- a) controle de uma gama maior de espécies;
- b) redução do risco de seleção de populações resistentes;
- c) aumento da segurança da cultura e redução de resíduos nas culturas e no solo, em função da aplicação de menores doses;
- d) redução de custos de aplicação, por conta de um menor número de aplicações por consequência da maior efetividade das aplicações e uso de menores doses;
- e) controle por um tempo maior devido a eficiência da interação.

5.1 INTERAÇÃO ENTRE CLETHODIM, DIQUAT E DIURON

Em relação às interações sinérgicas propriamente ditas, existem muitas e seria fora do escopo da presente revisão descrever todas, mas algumas puderam ser comprovadas, como é o caso do estudo realizado por Oliveira *et al.* (2024), que demonstraram a interferência da hora do dia na eficiência de diferentes tratamentos no controle de capim-amargoso (*Digitaria insularis* L.). No estudo foram conduzidos dois experimentos (no campo e na casa de vegetação) com capim amargoso no estágio com 3 a 4 perfilhos, sendo usados 3 tratamentos:

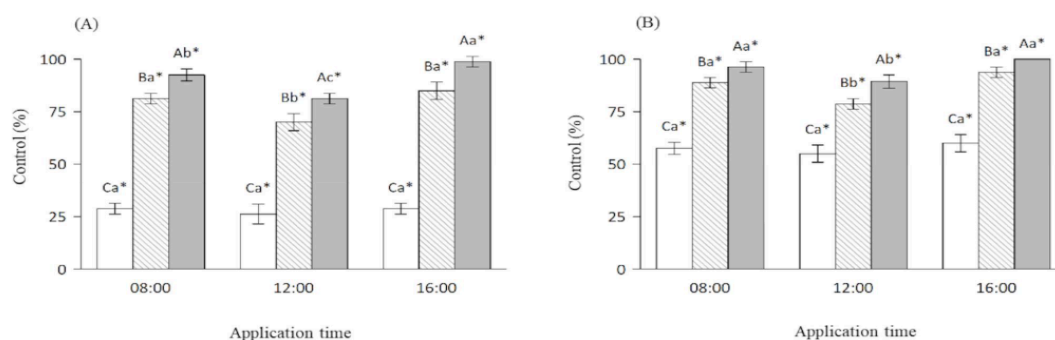
- a) clethodim, inibidor da ACCase;
- b) clethodim + diquat, adição do inibidor do fotossistema I;
- c) clethodim + diquat + diuron, adição do inibidor do fotossistema II à mistura.

Os testes foram realizados levando em consideração 3 horários de aplicação diferentes (8:00, 12:00 e 16:00).

Os resultados (Figura 5.1) mostraram que a adição de diuron a mistura clethodim + diquat aumenta significativamente o controle do capim-amargoso, levando a um controle de 100% quando aplicado às 16:00, sem rebrotas subsequentes. O autor conclui que a mistura dos 3 produtos aplicada às 16:00 mostrou maior eficiência no controle do capim-amargoso, e que a adição do diuron

foi essencial para evitar rebrota, potencializando o efeito do clethodim e do diquat (Oliveira *et al.*, 2024).

Figura 5.1 - Controle 7 dias após tratamento (DAT) (A) e 15 DAT (B)



Fonte: Oliveira *et al.* (2024).

5.2 INTERAÇÃO ENTRE CLOMAZONE E METRIBUZIN

Outra interação sinérgica dos herbicidas do grupo C1 foi demonstrada em um estudo de Kruse (2002), em que, por meio de vários experimentos, ele buscou analisar o efeito sinérgico da associação entre metribuzin e clomazone, partindo da hipótese da existência de sinergismo entre os herbicidas inibidores do fotossistema I e dos inibidores da biossíntese de carotenoides. Para essa análise foram feitos experimentos em diferentes ambientes, neste caso em laboratório, casa de vegetação e campo. Os experimentos foram os seguintes:

- no laboratório foi analisado o estresse oxidativo da associação em plantas de girassol através da medição do malondialdeído e do extravasamento eletrolítico, que são indicadores de estresse oxidativo;
- em casa de vegetação, foram produzidas amostras, a partir de girassóis tratados com os mesmos herbicidas, para eletromicrografias a fim de visualizar os cloroplastos das plantas tratadas e não tratadas;
- a campo foi conduzido um experimento de controle de *Bidens pilosa* infestando a cultura da soja;
- também foram conduzidas avaliações de seletividade, na cultura da soja com metribuzin, e clomazone e na cultura do milho.

Nos experimentos com malonaldeído, extravasamento eletrolítico e eletromicrografia, todos demonstraram a presença do efeito sinérgico da associação dos dois herbicidas. Os experimentos em campo com *Bidens pilosa* também demonstraram um maior controle e maior redução da cobertura do solo pela planta daninha quando controlada pela associação dos herbicidas. Por último, nas avaliações de seletividade, a associação entre os ingredientes não apresentou nenhum dano (Kruse, 2002).

6 RESISTÊNCIA

Em função da intensa utilização recorrente de herbicidas do mesmo grupo em uma área, as plantas sofrem seleção genética, o que leva a uma maior recorrência de variantes resistentes a certos grupos químicos e, conseqüentemente, falhas no controle. Segundo Oliveira Junior, Constantin e Inoue (2011), a resistência pode ser simples, cruzada, a qual seleciona uma daninha resistente a dois herbicidas com o mesmo mecanismo de ação, e múltipla, neste caso a resistência ocorre em relação a dois mecanismos de ação.

Resistência é a ocorrência natural da habilidade hereditária de alguns biótipos de plantas daninhas dentro de uma população, os quais são capazes de sobreviver a um tratamento herbicida que, sob condições normais de uso, controlaria de forma efetiva esta população de plantas daninhas.

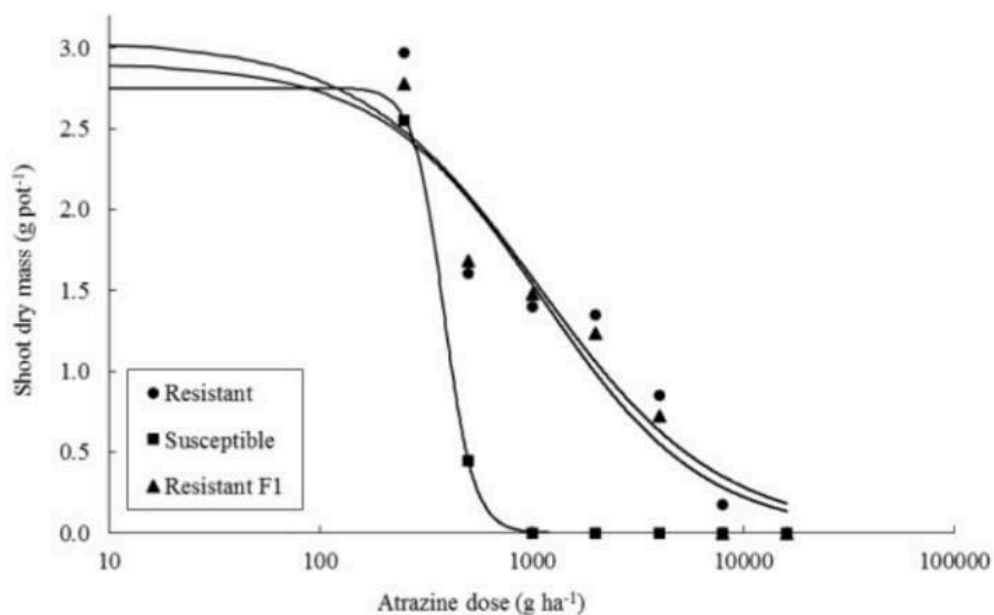
6.1 CASOS RECENTES DE RESISTÊNCIA

Segundo o experimento realizado por Francischini *et al.* (2019) relacionado a algodão, o caruru-gigante (*Amaranthus retroflexus*) possui resistência múltipla confirmada para inibidores da ALS e fotossistema II. No experimento, sete experimentos de dose-resposta foram realizados em casa de vegetação com os herbicidas atrazine, prometryn, diuron junto aos inibidores da ALS. As doses foram de 0, 1/4, 1/2, 1, 2 e 4 vezes a recomendada. Dos 8 biótipos avaliados, algumas das resistências confirmadas foram: resistência de um biótipo a prometryn, um biótipo com resistência múltipla a prometryn e inibidores da ALS, e também um biótipo com resistência múltipla a triazinas e pirimidio-benzoatos (pyrithiobac). No caso dos inibidores do fotossistema II, o diuron foi eficiente no controle de todas as populações e pode ser utilizado como uma alternativa de controle.

Em um outro trabalho, realizado por Takano *et al.* (2016), foi verificada a resistência de picão-preto (*Bidens pilosa*) a imazethapyr e atrazina. Foram realizados dois experimentos em casa de vegetação, um para cada herbicida. Dois fatores foram considerados: diferentes populações (suscetível, resistente parental e resistente) junto a diferentes doses de cada herbicida. Os resultados mostraram que as plantas vindas de Quarto Centenário (PR) apresentam resistência múltipla a dois mecanismos de ação: inibidores do fotossistema II (atrazine) e do ALS

(imazethapyr). Também foi verificado que a dose máxima de registro dos herbicidas não controlou os biótipos resistentes (Figura 6.1).

Figura 6.1 - Resposta de diferentes populações de picão-preto a doses crescentes de atrazina



Fonte: Takano *et al.* (2016).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os herbicidas inibidores do fotossistema II seguem sendo um grupo de alta relevância no programa de manejo das plantas daninhas em grandes culturas como milho, soja, café, cana, entre outras. E, apesar de ser um grupo descoberto há muito tempo, ainda apresenta alta importância na agricultura moderna, demonstrando grande eficácia e versatilidade no uso, principalmente se associados com outras moléculas.

A literatura destaca as interações sinérgicas dos inibidores do fotossistema II com alguns outros mecanismos de ação, como é o caso dos inibidores do fotossistema I e inibidores da biossíntese de carotenoides, que aumentam consideravelmente a eficiência no controle de plantas invasoras, reduzindo o rebrote e aumentando o estresse oxidativo. Estudos como o de Oliveira *et al.* (2024) e Krüge (2002) demonstram experimentalmente o sinergismo entre esses herbicidas, reforçando a importância dessas misturas para um manejo mais completo.

Contudo, o uso descuidado e contínuo desses herbicidas tem contribuído para o surgimento de resistência múltipla, portanto isso reforça que é necessário manter um manejo sustentável dos herbicidas, alternando mecanismos de ação, usando misturas comprovadamente eficientes e monitorando constantemente as populações da área.

Assim, os inibidores do fotossistema II, apesar de sua longa história de uso, ainda apresenta um grande potencial quando utilizado de maneira estratégica e integrada com outras práticas de manejo. O aprofundamento em pesquisas sobre sinergias e seletividade pode ampliar o papel desse grupo em sistemas agrícolas sustentáveis e eficientes.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.S; RODRIGUES, B.N. Guia de Herbicidas: contribuição para o uso adequado em plantio direto e convencional. Londrina: Iapar, 1985. 482 p.

CARVALHO, L.B. **Herbicidas**. Lages: Autoria Própria do Autor, 2013. 72 p.

CORREIA, N.M; CARVALHO, A.D.F. **Seletividade do metribuzin para a cultura da cenoura**. 168. ed. Brasília: Embrapa Hortaliça, 2018.

FRANCISCHINI, A.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA JUNIOR, R.s.; TAKANO, H.K.; MENDES, R.R.. Multiple-and Cross-Resistance of *Amaranthus retroflexus* to Acetolactate Synthase (ALS) and Photosystem II (PSII) Inhibiting Herbicides in Preemergence. **Planta Daninha**, [S.L.], v. 37, p. 1-10, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-83582019370100026>.

HANSEN, A. *et al*. Atrazina: un herbicida polémico. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, Nuevo Leon, v. 6, n. 29, p. 65-86, jul. 2013.

MARCHI, G.; MARCHI, E. C. S.; GUIMARÃES, T. G. Herbicidas: mecanismos de ação e uso. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2008. 36 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111 ; 227).

MENDES, K.F; SILVA, A.A. (org.). **Plantas daninhas: herbicidas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. 2 v.

OLIVEIRA, G.M.P; GOMES, D.G; DALAZEN, G. Clethodim and photosystem inhibitors on sourgrass control as a function of application time. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 55, n. 3, p. 1-10, 4 set. 2024. GN1 Sistemas e Publicações Ltd.. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20240039>.

OLIVEIRA JUNIOR, R.S; CONSTANTIN, J; INOUE, M.H. Biologia e Manejo de plantas daninhas. Curitiba: Omnipax, 2011. 348 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2017.

TAKANO, H.K.; OLIVEIRA, JR., R.S.; CONSTANTIN, J.; BRAZ, G.B.P.; FRANCHINI, L.H.M.; BURGOS, N.M. Multiple resistance to atrazine and imazethapyr in hairy beggarticks (*Bidens pilosa*). **Ciência e Agrotecnologia**, [S.L.], v. 40, n. 5, p. 547-554, out. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542016405022316>.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROJETANDO AGRICULTURA COMPROMISSADA EM SUSTENTABILIDADE

André Zanini Pimentel
Leandro Tanabe Biro

Inibidores do Fotossistema I

Piracicaba - SP
Junho - 2025

ANDRÉ ZANINI PIMENTEL
LEANDRO TANABE BIRO

Inibidores do Fotossistema I

Revisão bibliográfica apresentada ao grupo **Projetando Agricultura Compromissada** em Sustentabilidade, vinculado ao Departamento de Ciências do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, para o processo seletivo de Verão 2025.

Orientadores: Prof. Dr. Fernando Dini Andreote e Prof. Dr. Moacir Tuzzin de Moraes.

Coordenadores: Benjamin Clemente Marinho e Ricardo Fuchs.

Piracicaba - SP
Maio - 2025

1 INTRODUÇÃO

Por definição uma planta daninha é caracterizada como qualquer espécie vegetal que esteja em um local onde ela não é desejada e que compete por recursos com as plantas cultivadas. Existem outros termos que designam essa classe de plantas como invasoras ou ervas daninhas. Porém o termo erva daninha não está totalmente correto visto que em torno de 20% das plantas daninhas não são herbáceas, sendo arbustivas ou até arbóreas.

Essas plantas invasoras podem levar a uma redução de até 80% da produtividade final da cultura caso não sejam controladas. As plantas daninhas podem reduzir a produtividade por meio da competição direta com as plantas cultivadas, além de compostos alelopáticos com efeitos adversos sobre a cultura. Mas existem outros efeitos indiretos da presença das plantas daninhas, como reduzir a qualidade de grãos, causar maturação desuniforme, dificultar a operação de colheita, servir de hospedeiras para pragas e doenças, podendo até reduzir o valor comercial da terra (Agostinetto *et al.*, 2015).

Foi a partir da Revolução Verde, ocorrida nos anos de 1940 a 1970, quando houve o surgimento de diversas novas tecnologias dentro dos campos de irrigação, mecanização rural, fertilizantes, defensivos e plantas selecionadas para altas produtividades. E foi nessa época que houve um rápido crescimento na demanda de herbicidas no País devido a incentivos do governo para o uso de defensivos agrícolas.

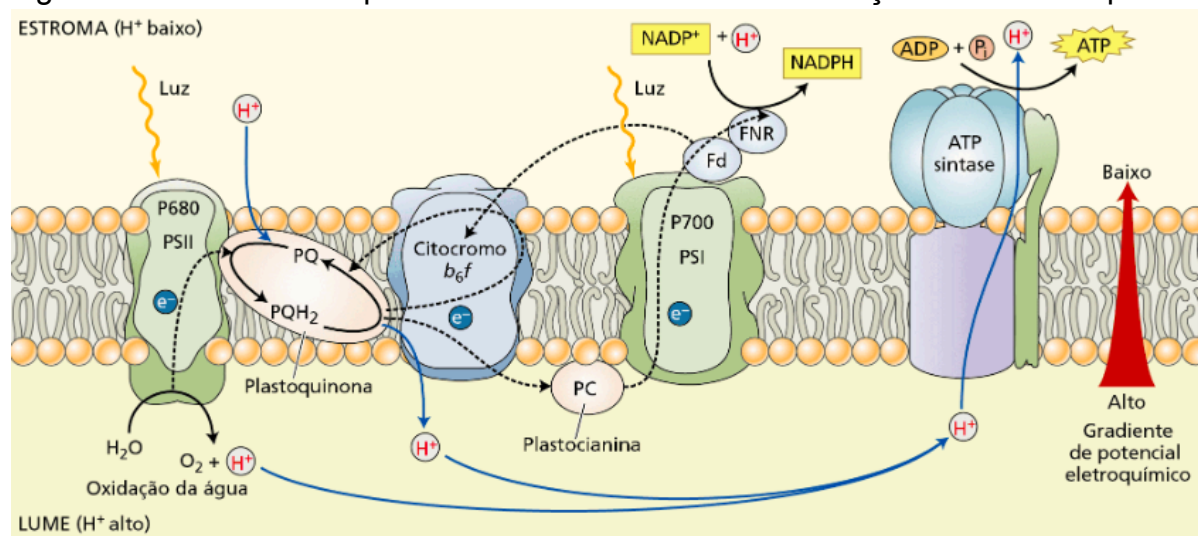
Apesar de existirem diversos meios para manejar plantas daninhas, o mais utilizado atualmente é o manejo químico. Essa metodologia consiste na aplicação de produtos químicos que inibem o crescimento e/ou levam à morte das plantas indesejadas. Os produtos podem fazer isso de diversas formas, através da inibição de enzimas para a formação de aminoácidos até a inibição de componentes essenciais para a fotossíntese como os inibidores da protoporfirinogênio oxidase na rota da formação da clorofila

O presente trabalho tem como objetivo discorrer sobre aspectos gerais e aplicabilidade dos herbicidas inibidores do fotossistema I. Esses herbicidas de forma resumida atuam como falsos aceptores de elétrons, formando radicais livres que transferem esses elétrons para o oxigênio formando espécies reativas de oxigênio.

2 REAÇÕES FOTOQUÍMICAS DA FOTOSSÍNTESE

De forma geral, para que seja possível o entendimento do funcionamento dos herbicidas inibidores do fotossistema I (FSI) é necessário que haja uma breve explicação do processo fotoquímico da fotossíntese. Assim, uma vez que a energia luminosa atinge o centro de reação, responsável por canalizar e transferir energia advindo da luz por meio da ressonância, o par especial de clorofilas é excitado e torna-se um agente redutor muito forte, o que provoca a extrusão de um elétron, o qual é transferido a um receptor. Isso cria uma cadeia pela qual passa o elétron através da membrana do tilacoide, estrutura a qual faz parte da composição dos cloroplastos, em direção ao NADP^+ , sendo tal molécula oceptor final de elétrons. Contudo, para que essa transferência de elétrons e a formação de moléculas energéticas ocorra, é necessária uma série de proteínas e sistemas proteicos, como evidenciado na figura 2.1 (Evert; Eichhorn, 2022).

Figura 2.1 - Cadeia transportadora de elétrons e fotofosforilação na fase fotoquímica



Fonte: Taiz *et al.* (2024).

Explicando de modo simples, a luz incide sobre o fotossistema II (PSII), o que provoca sua oxidação, com o elétron sendo transferido à plastoquinona (PQ), um carregador móvel. O PSII é então prontamente reduzido à forma original a partir da fotólise d'água, em que esta libera O_2 e H^+ , sendo o próton remetido ao lúmen do cloroplasto. A plastoquinona, então, é convertida em plasto-hidroquinona (PQH_2), também chamada de plastoquinol, levando o elétron ao complexo citocromo b_6f e

liberando outro próton a partir do estroma ao lume. Os elétrons levados ao citocromo b_6f , são em parte transferidos a uma plastocianina, a qual carrega os elétrons até o PSI (Marschner, 2012; Kerbauy, 2013).

Após fotoxidação de seu centro de reação P700 (FSI), a chegada dos elétrons a partir da plastocianina reduz o PSI à sua forma original, e os elétrons que este emitiu seguem então por uma série de aceptores, até atingirem a ferredoxina. A partir desta, a maioria é transferida ao $NADP^+$, formando NADPH, cuja energia redutora é aproveitada na fase química da fotossíntese e em outros processos (Taiz *et al.*, 2024).

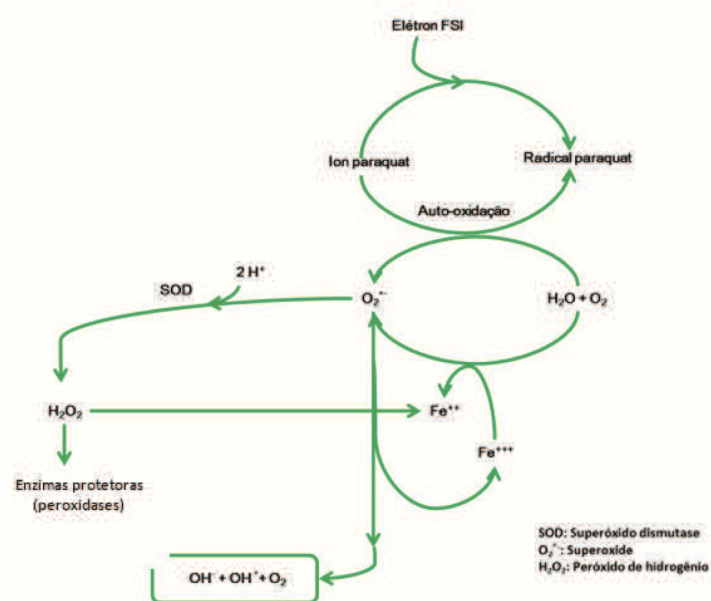
Dessa forma, é possível entender a função do FSI e a dinâmica da cadeia transportadora de elétrons, a qual será intrinsecamente afetada na presença dos herbicidas inibidores do FSI.

3 INIBIDORES DO FOTOSISTEMA I

Os herbicidas inibidores do fotossistema I são herbicidas não seletivos, geralmente utilizados na dessecação de áreas em pré-colheita e pré-plantio. Os herbicidas mais conhecidos desse grupo são o diquat e o paraquat. Tais herbicidas são amplamente utilizados nas culturas da soja, feijão, café entre outros. Na dessecação da soja, por exemplos, é recomendado a aplicação no estágio de R7.3 preferencialmente de noite ou logo antes do amanhecer, visto que sua ação necessita da luz solar, e para que não haja uma reação instantânea do produto com a luz, é de suma importância que, no momento da aplicação, não haja luz a fim de promover um melhor espalhamento do produto nas folhas (Santos, 2025).

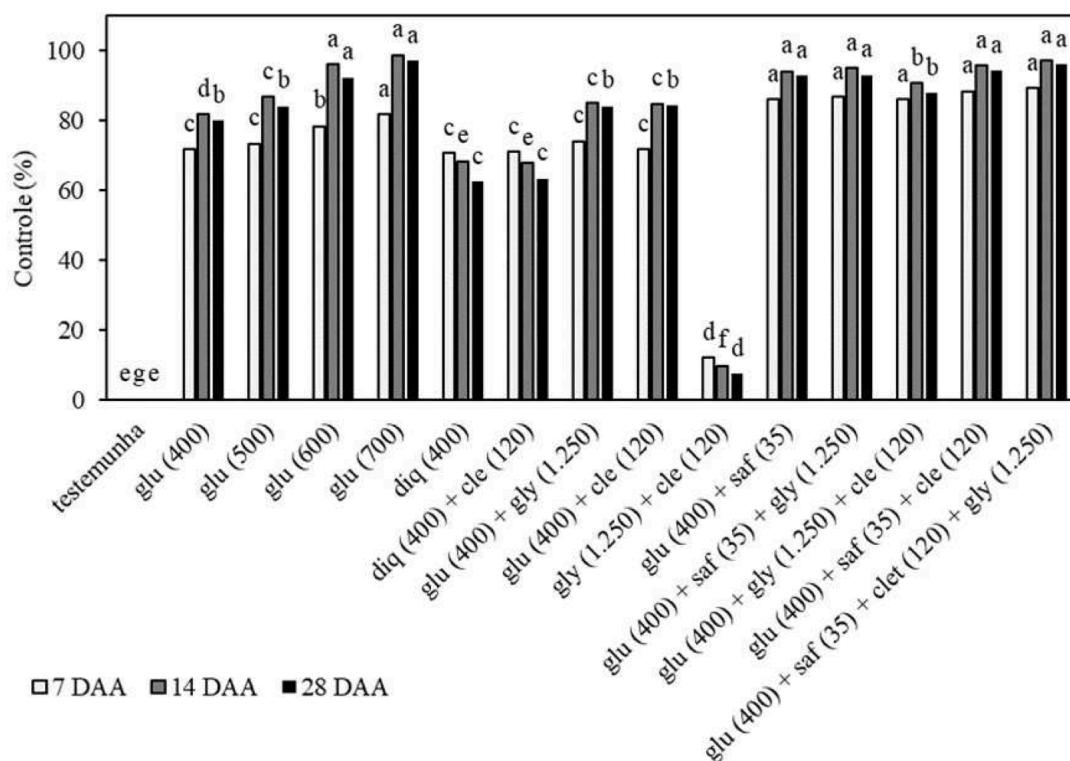
O FSI é um complexo proteico responsável pela transferência de elétrons produzindo moléculas energéticas como o NADPH advindo da redução do NADP^+ , como já explicitado anteriormente. Os herbicidas, por sua vez, atuam de forma direta na fotossíntese redirecionando os elétrons presentes no FSI produzindo um radical reduzido o qual reage rapidamente com uma molécula de oxigênio atmosférico gerando superóxidos de forma rápida. Essa alta produção de radicais livres supera os mecanismos de antioxidação da própria planta. Assim, as moléculas de superóxidos são transformadas em oxigênio e peróxido de hidrogênio pela ação da superóxido dismutase (SOD). Com isso, as moléculas de peróxido reagem com outras moléculas de superóxido por meio da intermediação de um íon de ferro livre dando origem a radicais de hidroxila (Figura 3.1). Esses radicais são altamente reativos e causam danos aos lipídeos presentes na membrana levando a clorose, pontuações necróticas após 1 a 2 horas depois da aplicação e posteriormente a morte da planta. (Christoffoleti *et al.*, 2016)

Figura 3.1 - Mecanismo de ação do paraquat



Fonte: Christoffoleti *et al.* (2016).

Contudo, um dos principais componentes desse grupo de herbicidas, o paraquat, teve seu uso e comercialização proibido pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) no dia 22 de setembro de 2017. Tal decisão é baseada nos indícios de alta toxicidade do herbicida para humanos. Com isso, o manejo de plantas daninhas, principalmente a buva (*Conyza spp.*), foi largamente afetado, haja visto que o paraquat, junto ao glifosato, era um dos principais herbicidas para a dessecação de áreas em pré-semeadura visando o controle de daninhas como a buva. Contudo, antes mesmo de sua proibição, já se tinha indícios da diminuição da sua eficácia em relação ao controle de algumas daninhas, evidenciando que, mesmo sem a proibição, a necessidade de substituição de herbicidas com diferentes mecanismos de ação seria inevitável (Albrecht *et al.*, 2022). Dessa forma, alguns experimentos foram conduzidos a fim de encontrar alternativas que substituam o paraquat, como evidenciado pelo estudo feito por Albrecht *et al.* (2022), que demonstra a efetividade no controle de buva por outros herbicidas na (Figura 3.2).

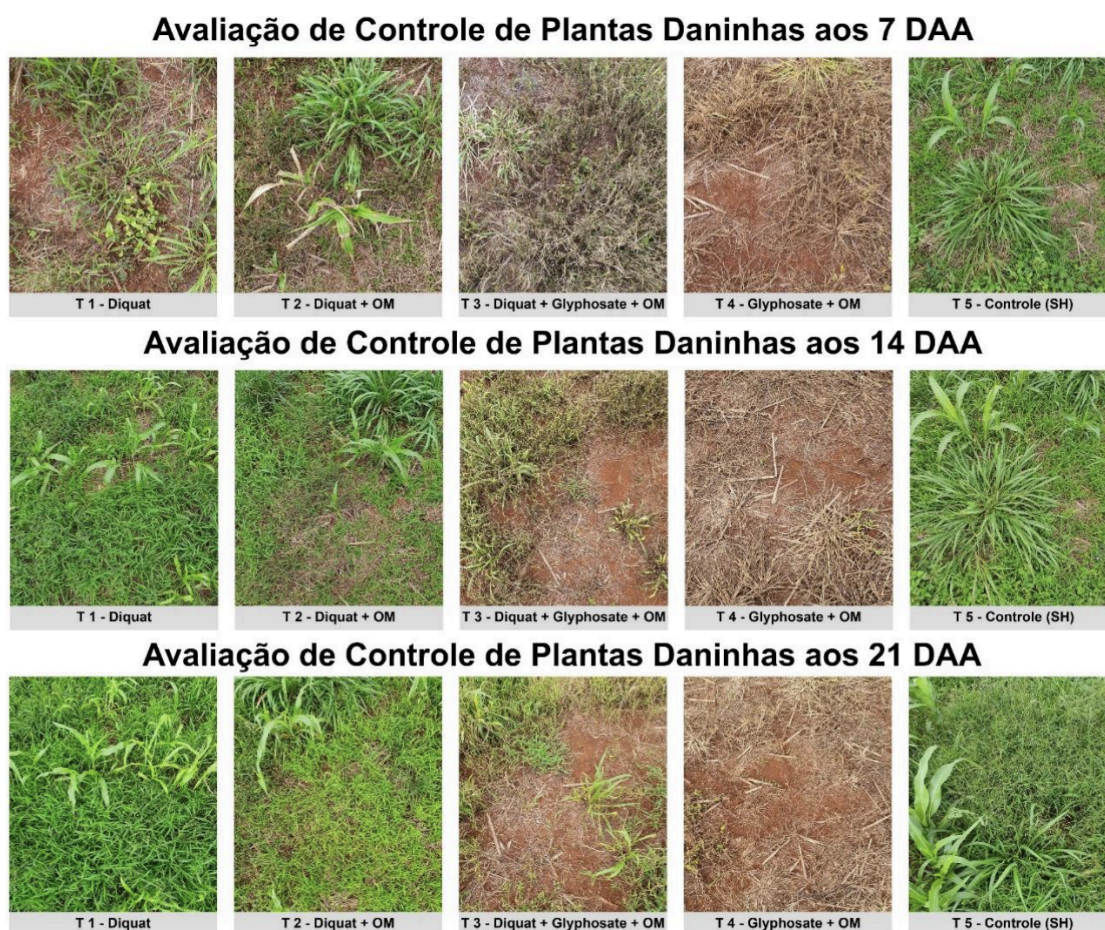
Figura 3.2 - Porcentagem de controle de *Conyza* spp. sob diferentes tratamentos

Fonte: Albrecht *et al.* (2022).

Sendo assim, um dos principais herbicidas substitutos ao paraquat é o diquat, herbicida de mesmo mecanismo de ação. Porém, para o controle de daninhas que apresentam resistência ao paraquat, o diquat não apresenta uma grande efetividade. Ademais, o uso de diquat é recomendado para o controle de eudicotiledôneas, visto que seu controle de gramíneas não apresenta grandes efetividades, mesmo com a utilização de adjuvantes (Albrecht *et al.*, 2022).

Além disso, a associação entre moléculas como o diquat e o glifosato como alternativa para a dessecação de áreas de pousio não é recomendada, principalmente quando há uma alta pressão de gramíneas na área, como evidenciado no estudo realizado por Sousa *et al.* (2023), em que se chegou à conclusão de que a junção de ambos os herbicidas provavelmente apresentou efeitos antagônicos. Tal afirmação fica clara quando a figura 3.3 e a tabela 3.1 são analisadas.

Figura 3.3 - Avaliação de controle de plantas daninhas sob diferentes tratamentos



Fonte: Sousa *et al.* (2023).

Tabela 3.1 - Porcentagem de controle de daninhas sob diferentes tratamentos

Tratamentos	Dose i.a ¹ g/L ha ⁻¹	% Controle de Plantas Daninhas		
		7 DAA ²	14 DAA	21 DAA
T 1 Diquat	400	10,00 c	7,50 cd	0,75 c
T 2 Diquat + Óleo Mineral	400+ 214	11,75 c	10,00 c	2,25 c
T 3 Diquat + Glifosato + Óleo Mineral	400 + 1.080 + 214	32,50 b	38,75 b	23,75 b
T 4 Glifosato + Óleo Mineral	1.080 + 214	68,75 a	83,75 a	92,75 a
T 5 Controle ³	0	0,00 d	0,00 d	0,00 c
CV (%)		15,54	15,63	16,04

Fonte: Sousa *et al.* (2023).

Com isso, é válido ressaltar que a utilização e eficácia do diquat é fortemente influenciada pelo estágio fenológico que o alvo se encontra. No estudo realizado por Pereira *et al.* (2016), o qual teve como objetivo apresentar alternativas de herbicidas para o controle de buva resistente ao glifosato, obteve-se resultado favorável com o uso do diquat quando aplicado na rebrota da buva, como evidenciado na tabela 3.2.

Figura 3.2 - Porcentagem de controle de buva em pré-florescimento (PF) e em rebrota (RB) sob diferentes tratamentos

Herbicidas	7 DAA		14 DAA		21 DAA		28 DAA	
	PF	RB	PF	RB	PF	RB	PF	RB
Glyphosate	1 Ac	4 Ac	1 Bd	10 Ab	1 Bd	24 Ab	1 Bd	24 Ab
Glufosinate	71 Ba	91 Aa	94 Aa	98 Aa	96 Aa	100 Aa	99 Aa	100 Aa
Diquat	66 Ba	84 Aa	70 Ba	93 Aa	76 Bb	100 Aa	76 Bb	100 Aa
Bentazon	29 Bb	68 Ab	34 Ba	97 Aa	43 Bc	100 Aa	33 Bc	100 Aa
Glyphosate+Saflufenacil	66 Ba	91 Aa	73 Ba	97 Aa	78 Bb	100 Aa	71 Bb	100 Aa

Fonte: Pereira *et al.* (2016)

4 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Tendo em vista a proibição do paraquat, o único ingrediente ativo que restou desse grupo no mercado brasileiro foi o diquat. Ambas essas moléculas fazem parte de um grupo químico chamado de bipyridílios.

Segundo Oliveira Jr *et al.* (2011), os herbicidas desse grupo apresentam alta solubilidade em água e, por conta disso, são muitas vezes formulados em soluções aquosas. Ademais, são cátions fortes, o que concorre para sua adsorção pelos colóides do solo, resultando na sua rápida inativação. Apresentam uma rápida absorção foliar o que explica o fato de chuva 30 minutos após a aplicação não interferirem na eficiência do produto. É um ingrediente ativo de ação rápida, a morte da planta acontece de um a dois dias após a aplicação. A velocidade de aparecimento dos sintomas de fitointoxicação será tão mais rápida quanto maior for a intensidade luminosa após a aplicação.

São considerados produtos de contato, visto que a planta morre antes mesmo de o produto conseguir translocar-se na planta. O diquat, seja em mistura ou isolado, é muito usado em sistemas de plantio direto para a dessecação de áreas não cultivadas, renovação de pastagens e dessecação pré-colheita. São herbicidas não seletivos no geral, existem registros de casos de plantas resistentes devido a altas concentrações das enzimas superóxido dismutase, catalase e peroxidase. Apesar do amplo espectro de ação, esse herbicida pode ser usado de modo seletivo por meio do uso de jatos dirigidos em pós emergência, nos quais se evita o contato dos jatos com as plantas cultivadas (Oliveira Jr *et al.*, 2011).

O diquat apresenta uma alta persistência no ambiente visto que se liga fortemente às moléculas dos colóides do solo e à matéria orgânica. Mas mesmo com essa alta persistência ele não apresenta quaisquer efeitos de carryover para outras culturas, pois quando está ligado às partículas do solo ele se torna inativo. As propriedades físico-químicas do diquat são dispostas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades físico-químicas do diquat

Propriedade	Unidade	Valor	Interpretação
Solubilidade em água	mg/L	718000	Alta
Log de K_{ow}	-	-4,6	Baixo
Pressão de Vapor	mPa	0,001	Pouco volátil
Meia vida	dias	5500	Muito persistente
K_{oc}	mL/g	2185000	Pouco móvel no solo

Fonte: University of Hertfordshire (2025).

5 PRODUTOS E SINTOMATOLOGIA

Dentre os principais produtos a base de diquat, cumpre destacar o Reglone, da empresa Syngenta (Figura 5.1). Esse herbicida contém 200 g de ingrediente ativo em 1 L de produto comercial, em uma formulação do tipo concentrado solúvel, proporcionando alta solubilidade do produto em água.

Figura 5.1 - Reglone, produto à base de diquat



Fonte: Bula Reglone [s.d.].

Pode ser utilizado para dessecação pré-colheita da cultura da soja na concentração de 1,0 – 2,0 L/ha (200 a 400 g ia/ha). Deve-se fazer apenas uma aplicação quando a soja estiver no estágio R7.3. Segundo a bula, a aplicação pode ser feita de 3 formas:

- aplicação por pulverizador costal em uma calda de 200 L/ha;
- aplicação por pulverizador de barra tratorizado em uma calda de 200 a 300 L/ha;
- aplicação pela pulverização aérea numa calda de menor volume, 30 a 40 L/ha.

Considerando uma aplicação 2 dias antes da semeadura das culturas, em área total e pós-emergência das plantas daninhas presentes na área quando estas

apresentarem porte de 5 a 15 cm. A tabela 5.1 dispõe as plantas daninhas que podem ser controladas com esse herbicida.

Tabela 5.1 - Plantas daninhas controladas pelo Reglone nas culturas de soja, algodão, milho e girassol

Nome comum	Nome científico	Dose
Leiteiro	<i>Euphorbia heterophylla</i>	1,5 L/ha (300 g ia/ha)
Caruru-de-mancha	<i>Amaranthus viridis</i>	
Trapoeiraba	<i>Commelina benghalensis</i>	
Buva	<i>Conyza canadenses</i>	2 L/ha (400 g ia/ha)
Soja tiguer	<i>Glycine max</i>	
Algodão tiguer	<i>Gossypium hirsutum</i>	
Corda-de-viola	<i>Ipomoea grandifolia</i>	2,5 L/ha (500 g ia/ha)
Milho tiguer	<i>Zea mays</i>	3 L/ha (700 g ia/ha)

Fonte: Bula Reglone [s.d.].

Em alguns casos pode ocorrer a deriva desse produto para uma área indesejada, atingindo plantas que não o deveriam. Nessas situações ocorrem casos de fitotoxidez causada pela ação do diquat sobre plantas cultivadas. Em casos como esse a planta apresenta sintomas muito característicos, murcha severa seguida de necrose. Esses sintomas podem ser vistos horas após a aplicação, principalmente em presença de luz. A figura 5.2 ilustra bem os sintomas de diquat sobre plantas de soja.

Figura 5.2: Sintomas de fito de diquat em soja



Fonte: Giraldeleli (2023).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o exposto, os herbicidas inibidores do fotossistema I atuam como “falsos aceptores” na passagem de elétrons do FSI para o NADP⁺. Uma vez que recebem esses elétrons, eles são transferidos rapidamente para moléculas de oxigênio formando espécies reativas de oxigênio, que, por meio de reações em cadeia destroem estruturas celulares das células vegetais. Esse modo de ação explica sua eficácia como dessecante de contato, com sintomas visíveis 1 a 2 dias após a aplicação.

O diquat está presente no produto comercial Reglone, e apresenta uma altíssima solubilidade em água, isso explica a rápida absorção desse produto pela planta. Além disso, ele apresenta uma alta persistência no solo visto que ele é um cátion forte. Por mais que fique muito tempo no solo ele não apresenta efeito sobre outras culturas quando está retido no solo.

De amplo espectro de ação, esses produtos, principalmente o diquat após a proibição do paraquat, são indicados para dessecação pré-colheita da soja e renovação de pastagens, devendo ser aplicados preferencialmente no período noturno, quando permanecem sobre a folha sem fotoativação imediata. Para otimizar o manejo e reduzir a seleção de populações resistentes, recomenda-se a rotação com herbicidas de diferentes mecanismos de ação e o uso de técnicas complementares como jato dirigidos em pós emergência.

REFERÊNCIAS

AGOSTINETTO, Dirceu et al. Manejo de Plantas Daninhas. In: SEDIYAMA, Tuneo et al. **Soja: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2015. Cap. 11. p. 234-255.

Albrecht, Alfredo, et al. Alternativas Ao Paraquat Para O Controle Químico de Azevém, Aveia E Buva. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, vol. 10, no. 1, 2022, <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v10n1.albrecht>.

Bleasdale, John. **Fisiologia Vegetal**. E.P.U, 1977.

GIRALDELI, Ana Lígia. **Herbicidas inibidores do fotossistema I**. Disponível em: <https://agroreceita.com.br/herbicidas-inibidores-do-fotossistema-i/>. Acesso em: 9 jun. 2025.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 2013. 431 p.

Leonardo, Bianco, e De Carvalho. **Mecanismos de Ação de Herbicidas**.

Marchi, Giuliano, et al. **Herbicidas: Mecanismos de Ação E Uso**. 2008.

OLIVEIRA JUNIOR, Rubens Silverio de; CONSTANTIN, Jamil; INOUE, Miriam Hiroko. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011.

Sousa, Ueliton Venancio de, et al. “Interação Da Mistura Em Tanque Entre Os Herbicidas Diquat E Glyphosate Na Dessecação de Área Em Pousio.” *Brazilian Journal of Science*, vol. 2, no. 2, 3 Jan. 2023, pp. 61–70, <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i2.264>. Acesso em: 25 Jan. 2023.

Yamauti, Micheli Satomi, et al. “Controle Químico de Biótipos de Buva (*Conyza Canadensis* E *Conyza Bonariensis*) Resistentes Ao Glyphosate.” *Revista Ciência Agronômica*, vol. 41, no. 3, Sept. 2010, pp. 495–500, <https://doi.org/10.1590/s1806-66902010000300025>. Acesso em: 31 Dez. 2019.