

oficina de textos

*Kassio Ferreira Mendes  
Antonio Alberto da Silva*

---

ORGANIZADORES

# **PLANTAS DANINHAS** herbicidas

volume 2

© Copyright 2022 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

**Conselho editorial** Aluízio Borém; Arthur Pinto Chaves; Cylon Gonçalves da Silva;  
Doris C. C. K. Kowaltowski; José Galizia Tundisi;  
Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene;  
Rozely Ferreira dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano

**Capa e projeto gráfico** Malu Vallim  
**Foto da capa** Francisco Cláudio Lopes de Freitas  
**Preparação de figuras** Kaori Uchima  
**Diagramação** Luciana Di Iorio  
**Preparação de textos** Natália Pinheiro Soares  
**Revisão de textos** Ana Paula Ribeiro  
**Impressão e acabamento** Mundial gráfica

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

---

Mendes, Kassio Ferreira  
Plantas daninhas : herbicidas / Kassio Ferreira  
Mendes, Antonio Alberto da Silva. -- 1. ed. --  
São Paulo : Oficina de Textos, 2022.

ISBN 978-65-86235-68-5

1. Ervas daninhas 2. Ervas daninhas - Controle -  
Brasil 3. Ervas daninhas - Semente 4. Herbicidas  
I. Silva, Antonio Alberto da. II. Título.

22-116472

CDD-632.58

---

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Ervas daninhas : Biologia : Controle e manejo :  
Agricultura 632.58

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Todos os direitos reservados à **Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 798

CEP 04013-003 São Paulo SP Brasil

Fone: (11) 3085-7933

[www.ofitexto.com.br](http://www.ofitexto.com.br)

[atend@ofitexto.com.br](mailto:atend@ofitexto.com.br)

# PREFÁCIO

O primeiro herbicida sintético, ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), foi descoberto em 1942, e sua eficácia e seletividade causaram uma mudança de paradigma nas práticas de manejo de plantas daninhas na agricultura mundial. Desde então, o controle químico de plantas daninhas passou a ser o método mais utilizado no mundo, por ser muito eficiente, ter custo relativamente baixo quando comparado aos outros métodos de controle, ser de fácil utilização e profissionalmente adequado.

No entanto, a maioria dos produtores possui uma visão imediatista e econômica no controle das plantas daninhas, o que pode gerar problemas ambientais a médio e longo prazo. Aplicações repetidas de herbicidas com o mesmo mecanismo de ação têm sido prática comum em muitas partes do globo. Devido à alta pressão de seleção contínua na maioria dos casos, muitas populações de plantas daninhas têm selecionado resistência a herbicidas em várias regiões agrícolas e não agrícolas.

Essa resistência de plantas daninhas a herbicidas é, sem dúvida, uma das principais preocupações da agricultura moderna, e alguns mecanismos de ação apresentam maiores problemas de resistência do que outros. O maior número de casos de biótipos resistentes é pertencente ao mecanismo de ação dos inibidores da acetolactato sintase (ALS), seguido dos inibidores do fotossistema II (FSII). Hoje, herbicidas com novos mecanismos de ação se fazem extremamente necessários para controlar a evolução da resistência desses biótipos aos herbicidas existentes.

Além disso, é fundamental que os herbicidas sejam adequadamente aplicados, para que seja preservada a qualidade final dos produtos colhidos, bem como dos recursos naturais que sustentam a produção, especialmente o solo e a água. A forma correta de aplicação desses produtos visa a máxima eficácia biológica, o mínimo de danos às culturas vizinhas, ao meio ambiente e ao homem. Tal eficácia será tanto maior quanto mais adequados forem os equipamentos e as técnicas empregadas. Nesse sentido, a tecnologia de aplicação de herbicidas consiste no emprego de todos os conhecimentos científicos que proporcionem a deposição correta do produto biologicamente ativo no alvo no momento adequado, na quantidade necessária, de forma econômica e com o mínimo de contaminação ambiental.

Diante do exposto, verifica-se a importância de estudar o comportamento dos herbicidas na planta e no solo para, assim, poder controlar as plantas daninhas. Atualmente, esse estudo tem sido realizado por meio de estimativas das tendências a que eles estão sujeitos, em função de três principais processos: retenção,

transformação e transporte na planta, que interagem entre si, embora sejam descritos de forma isolada. Assim, o simples fato de um herbicida atingir as folhas da planta ou ser aplicado no solo onde ela se desenvolve não é suficiente para que ele exerça a sua ação; ele deve penetrar na planta, se translocar e atingir a organela onde irá atuar. Para determinar o produto correto a ser utilizado em cada cultura e em cada solo, o profissional deve conhecer as características do metabolismo do produto e a sensibilidade da planta a esse produto e/ou seus metabólitos, entre outros fatores, como a forma de aplicação mais promissora.

Abrangendo todos esses assuntos, *Plantas daninhas: herbicidas* é o livro mais atual e completo sobre o tema no Brasil, composto por cinco capítulos sobre a ciência aplicada dos herbicidas, e é destinado a estudantes de graduação, pós-graduação, técnicos, professores, produtores rurais e a todos os envolvidos nessa área.

*Prof. Dr. Kassio Ferreira Mendes*


*Prof. Dr. Antonio Alberto da Silva*

Biologia e Manejo Integrado de Plantas Daninhas  
Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa  
Viçosa, Minas Gerais, Brasil

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Classificação, seletividade e mecanismos de ação de herbicidas .....</b>	<b>7</b>
1.1	Seletividade de herbicidas.....	8
1.2	Época de aplicação .....	10
1.3	Absorção e translocação.....	11
1.4	Efeito residual .....	11
1.5	Mecanismos de ação .....	11
1.6	Considerações finais .....	56
<b>2</b>	<b>Retenção, absorção, translocação e metabolismo de herbicidas em plantas ...</b>	<b>57</b>
2.1	Retenção e absorção de herbicidas pela planta .....	57
2.2	Translocação de herbicidas .....	63
2.3	Metabolização de herbicidas nas plantas .....	65
2.4	Métodos de avaliação de comportamento de herbicidas em plantas .....	69
2.5	Considerações finais .....	73
<b>3</b>	<b>Evolução da resistência de plantas daninhas a herbicidas.....</b>	<b>74</b>
3.1	Sensibilidade, tolerância e resistência .....	76
3.2	Fatores que favorecem o surgimento da resistência .....	80
3.3	Diagnóstico da resistência a campo .....	81
3.4	Confirmação da resistência .....	81
3.5	Mecanismos que conferem resistência .....	82
3.6	Práticas para evitar a resistência.....	89
3.7	Evolução da resistência de plantas daninhas no Brasil.....	90
3.8	Manejo integrado de plantas daninhas resistentes (MIPDR).....	95
3.9	Considerações finais .....	98
<b>4</b>	<b>Dinâmica e destino de herbicidas no solo.....</b>	<b>100</b>
4.1	Importância do estudo da dinâmica de herbicidas no solo .....	101
4.2	Processos de retenção.....	101
4.3	Processos de transporte.....	115
4.4	Processos de transformação .....	122
4.5	Considerações finais .....	128
<b>5</b>	<b>Desafios e avanços na tecnologia de aplicação de herbicidas .....</b>	<b>129</b>
5.1	Eficiência na aplicação de herbicidas.....	130
5.2	Métodos de aplicação de herbicidas .....	131
5.3	Aplicação líquida por pulverização hidráulica.....	131
5.4	Deriva de herbicidas na aplicação: causas e controle .....	135
5.5	Cobertura do alvo .....	139
5.6	Volume de calda .....	140
5.7	Pulverizadores para aplicação de herbicidas .....	141

5.8	Componentes dos pulverizadores.....	146
5.9	Uniformidade de distribuição da pulverização .....	162
5.10	Regulagem e calibração dos pulverizadores .....	163
5.11	Aspectos relacionados à segurança na aplicação de herbicidas .....	167
5.12	Considerações finais .....	170
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>172</b>

As figuras com o símbolo  têm sua versão colorida no final do livro.

# 1 | CLASSIFICAÇÃO, SELETIVIDADE E MECANISMOS DE AÇÃO DE HERBICIDAS

*Kassio Ferreira Mendes  
Antonio Alberto da Silva  
Kamila Cabral Mielke*

O primeiro herbicida sintético, o ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), foi descoberto em 1942 e sua eficácia e seletividade causaram uma mudança de paradigma nas práticas de manejo de plantas daninhas na agricultura mundial (Sterling; Hall, 1997; Dayan, 2018). Herbicidas com novos mecanismos de ação são extremamente necessários para controlar a evolução da resistência de biótipos de plantas daninhas aos herbicidas existentes. Desde a introdução dos herbicidas sintéticos, a indústria introduziu aproximadamente um novo mecanismo de ação a cada dois anos por várias décadas (Duke, 2012; Duke; Dayan, 2018) (Fig. 1.1). No entanto, nenhum novo mecanismo de ação importante foi introduzido no mercado nos últimos 30 anos e, provavelmente, existem várias razões para isso. Um primeiro fator foram os esforços reduzidos de descoberta de herbicidas, devido à perda de valor de mercado desses compostos, resultante do domínio do glyphosate após meados da década de 1990 (Duke; Dayan, 2018). Outro fator foi o resultado das consolidações de empresas e a disponibilidade de mais herbicidas genéricos. Por outro lado, o problema pode ter sido o fato de que os melhores locais-alvo moleculares do herbicida já tenham sido descobertos. No entanto, a magnitude relativa de cada uma dessas razões não é clara. Com o

estímulo econômico à indústria de herbicidas impulsionado pela evolução de biótipos de plantas daninhas resistentes a eles, pode ser que um ou mais novos mecanismos de ação se tornem disponíveis em um futuro não muito distante (Duke; Dayan, 2018).

A classificação dos herbicidas com base em seu mecanismo de ação tem sofrido mudanças ao longo do tempo, tanto em razão da descoberta de novos herbicidas quanto pela elucidação dos locais-alvo nas plantas (Oliveira Jr. et al., 2021). Até a edição deste livro, a classificação (alfabética) internacionalmente aceita é a proposta pelo Herbicide Resistance Action Committee (HRAC, s.d.), utilizada no rótulo e na bula dos produtos. Todavia, o sistema de classificação (numérico) americano da Weed Science Society of America (WSSA, s.d.) também é muito utilizado por pesquisadores. Infelizmente, o Brasil não possui um sistema de classificação próprio dos mecanismos de ação dos herbicidas.

É importante salientar que os herbicidas podem ser classificados de diversas outras maneiras, de acordo com as características de cada um. Essas características individuais permitem estabelecer grupos afins de herbicidas com base em sua seletividade, época de aplicação, absorção e translocação, persistência e mecanismo de ação (Weller, 2003c). Os herbicidas seletivos matam apenas

para a cultura e, nesse caso, devem ser aplicados antes da emergência (pré-emergência) da cultura, como é o caso do glyphosate e diquat aplicados no plantio direto de milho, trigo, feijão, entre outras; ou, em aplicação dirigida, em culturas perenes como fruteiras, reflorestamento e lavouras de café. Entretanto, se o herbicida é seletivo à cultura, ele pode ser aplicado em pós-emergência de ambas plantas daninhas e culturas, como nos exemplos de sethoxydim em tomate, feijão e soja, nicosulfuron em milho, e metsulfuron-methyl em trigo, entre outras.

Se o herbicida é absorvido pelas folhas e raízes, a sua aplicação em pré- ou pós-emergência vai depender da tolerância da cultura e também das condições nas quais ele apresenta melhor desempenho. É o caso do metribuzin, que pode ser usado em tomate em pré- e pós-emergência tardia ou após o transplante; todavia, na cultura da soja, somente pode ser usado em pré-emergência, porque em pós-emergência, até mesmo em subdoses, ele é muito tóxico à soja. Outro exemplo seria o atrazine, recomendado para as culturas de milho e sorgo. Quando esse produto for utilizado em pós-emergência, deve-se adicionar à calda óleo mineral, visando solubilizar parte da cera epicuticular e aumentar a sua penetração pelas folhas.

### 1.3 ABSORÇÃO E TRANSLOCAÇÃO

Os herbicidas podem ser de contato quando atuam próximo ou no local onde eles penetram nas plantas; alguns exemplos são diquat e lactofen. O simples fato de um herbicida entrar em contato com a planta não é suficiente para que ele exerça sua ação tóxica. Ele terá necessariamente que ser absorvido no tecido da planta, atingir a célula e, posteriormente, a organela, onde atuará para que seus efeitos possam ser observados.

Os herbicidas também podem se movimentar (translocar) nas plantas pelo xilema, pelo floema ou por ambos os vasos condutores. Quando o movimento (translocação) do herbicida é via floema e/ou xilema, ele é considerado sistêmico – esse tipo de herbicida é capaz de se translocar a grandes distâncias na planta, como é o caso do 2,4-D, glyphosate, imazethapyr, flazasulfuron, nicosulfuron, picloram etc. Tais produtos, quando usados em doses muito elevadas, podem apresentar ação de contato; nesse caso, a ação do produto pode ser mais rápida, porém com efeito final menor, porque a morte

rápida do tecido condutor (floema) limita a chegada da dose letal do herbicida a algumas estruturas reprodutivas das plantas.

### 1.4 EFEITO RESIDUAL

Os herbicidas podem ter ou não efeito residual. O glyphosate, por exemplo, não apresenta efeito residual. Os herbicidas aplicados diretamente no solo em pré-plantio ou pré-emergência podem persistir, causando um efeito residual no controle das plantas daninhas. Herbicidas persistindo por 30 dias ou menos podem ser usados para controlar plantas daninhas presentes no momento da aplicação (Monaco; Weller; Ashton, 2002). Os que persistem de 30 a 90 dias irão proteger a cultura apenas durante um curto período no início da estação de crescimento; isso geralmente é adequado para muitas culturas anuais em linha que produzem um dossel denso e, assim, suprimem o crescimento de plantas daninhas por meio do sombreamento. Aqueles que fornecem de 90 a 144 dias de controle podem proteger a cultura durante todo o ciclo de crescimento e são úteis em culturas perenes, como pomares. Já os que fornecem mais de 12 meses de controle são usados principalmente para o controle total da vegetação em situações não agrícolas onde a persistência é desejável, ou em monocultivo de culturas perenes. Como exemplo, a aplicação do indaziflam em cana-de-açúcar e eucalipto, ou do picloram em pastagens.

### 1.5 MECANISMOS DE AÇÃO

Para identificar os herbicidas, segundo Oliveira Jr. et al. (2021), é útil agrupá-los de acordo com seu mecanismo de ação nas plantas e sua estrutura química básica. Para tanto, o primeiro ponto importante que deve ser esclarecido é a diferença entre mecanismo de ação e modo de ação. Considera-se que o mecanismo de ação diz respeito ao primeiro ponto do metabolismo das plantas onde o herbicida atua; nesse caso, em geral é o primeiro de uma série de eventos metabólicos que resultam na expressão final do herbicida sobre a planta. É preciso lembrar que um mesmo herbicida pode influenciar vários processos metabólicos na planta, entretanto, é a primeira lesão que ele causa nela que caracteriza o seu mecanismo de ação (Thill, 2003a). O conjunto desses eventos metabólicos, incluindo os sintomas visíveis da ação do herbicida sobre a planta, é denominado modo de ação.



Quadro 1.1 (continuação)

Grupo HRAC	Classe WSSA	Mecanismo de ação	Rota ou processo-alvo	Grupo químico	Herbicida
C3	6	Inibição da fotossíntese no fotossistema II (FSII)	Fotossíntese (acopladores da D1 histidina 215)	Nitrilas	Bromoxynil Ioxynil Pyraclozil
				Benzotriazinonas	Bentazon
				Fenil-piridazinas	Pyridate
D	22	Inibição da fotossíntese no fotossistema I (FSI)	Fotossíntese (transferência de elétrons)	Bipiridílios	Cyperquat Diquat Morfamquat Paraquat
E	14	Inibição da protoporfirinogênio oxidase (PROTOX ou PPO)	Fotossíntese (biossíntese de heme e clorofila)	Difeniléteres	Aclifluorfen Bifenox Fluoroglycofen Fomesafen Lactofen Oxyfluorfen
				Fenilpirazoles	Pyraflufen-ethyl
				N-feniltalimidas	Flumiclorac Flumioxazin Trifludimoxazin
				Tiadiazoles	Fluthiacet-methyl
				Oxadiazoles	Oxadiargyl Oxadiazon
				Triazolinonas	Azafenidin Carfentrazone-ethyl Sulfentrazone
				Pirimidinedionas	Butafenacil Saflufenacil
				Piridazinonas	Flurtamone Norflurazon
F1	12	Inibição da biossíntese de carotenoides na fitoeno desaturase (PDS)	Fotossíntese (biossíntese de carotenoides)	Pirrolidinas	Flurochloridone
				Piridinecarboxamidas	Diflufenican Picolinafen
				Outros	Beflubutamid Fluridone
F2	27	Inibição da biossíntese de carotenoides na 4-hidroxifenilpiruvato dioxigenase (4-HPPD)	Fotossíntese (biossíntese de carotenoides)	Tricetonas	Mesotrione Sulcotrione Tembotrione Bicyclopyrone
				Isoxazoles	Isoxaflutole
				Pirazoles	Benzofenap Pyrasulfotole Pyrazolynate Pyrazoxyfen Topramezone
F3	34	Inibição da biossíntese de carotenoides (licopeno ciclase)	Fotossíntese (biossíntese de carotenoides)	Triazoles	Amitrole

## Síntese de aminoácidos

### a) Herbicida inibidor da 5-enolpiruvilchiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs)

O glyphosate, descoberto em 1975, é o único herbicida desse mecanismo de ação e o mais comercializado no mundo em diferentes formulações. No entanto, devido ao amplo espectro de controle de plantas daninhas e à elevada eficácia agrônômica associados ao aumento do cultivo de culturas geneticamente modificadas resistentes ao glyphosate, é muito importante usar esse herbicida de forma sustentável para evitar o surgimento de biótipos de plantas daninhas resistentes em todo o mundo (Mendes, 2021). Mesmo assim, já existem espécies de plantas daninhas tolerantes ao glyphosate, como a erva-quente (*Spermacoce latifolia*), trapoerabas (*Commelina benghalensis* e *Commelina diffusa*), erva-de-touro (*Tridax procumbens*), poaia-branca (*Richardia brasiliensis*), corda-de-viola (*Ipomoea grandifolia*), apaga-fogo (*Alternanthera tenella*), agriãozinho (*Synedrellopsis grisebachii*) e erva-de-santa-luzia (*Chamaesyce hirta*).

### Modo de ação

Logo após a aplicação, as plantas tratadas com o glyphosate param de crescer. Há uma redução acentuada, nas plantas tratadas, dos níveis dos aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina e triptofano. Por outro lado, é observado aumento acentuado da concentração de chiquimato, precursor comum na rota metabólica dos três aminoácidos aromáticos.

O local de ação do herbicida é a enzima 5-enolpiruvilchiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs). O glyphosate inibe a EPSPs por competição com o substrato PEP (fosfoenolpiruvato), evitando a transformação do chiquimato em corismato (Fig. 1.11). A enzima EPSPs é sintetizada no citoplasma e transportada para dentro do cloroplasto onde atua, e então o glyphosate se liga a ela pela carboxila do ácido glutâmico (glutamina) na posição 418 da sequência de aminoácidos (Shaner; Bridges, 2003). A simples redução de aminoácidos e a acumulação de chiquimato não seriam suficientes para a ação herbicida; acredita-se que a desregulação da rota do ácido chiquímico resulta na perda de carbonos disponíveis para outras reações celulares na planta, uma vez que 20% do carbono das plantas são utilizados nessa rota metabólica, pois a fenilalanina, a tirosina e o triptofano são

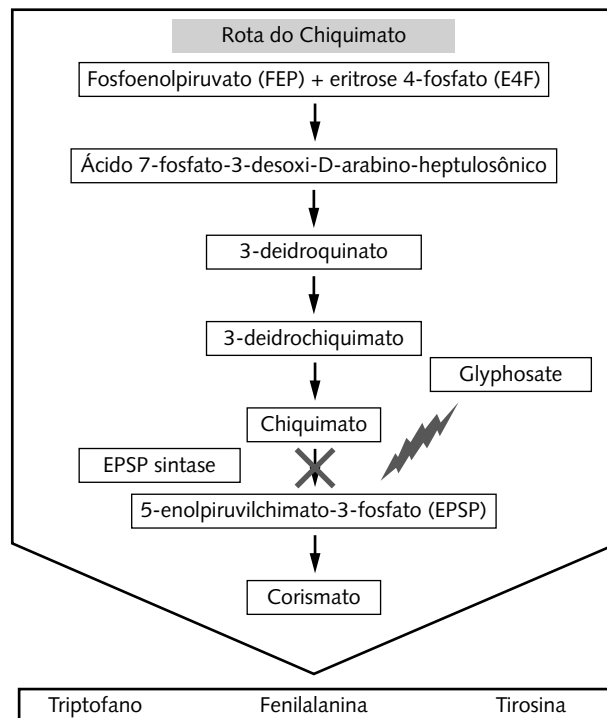
precursores da maioria dos compostos aromáticos nas plantas, como lignina, flavonoides e ácidos benzoicos.

O glyphosate também proporciona a redução da síntese de fitoalexinas. Há um aumento da concentração em níveis tóxicos de nitrato, etileno, ácido cinâmico e outros compostos que aceleram a morte da planta.

A EPSPs é encontrada em plantas, alguns fungos e bactérias (Dayan et al., 2018). A EPSPs de alguns fungos é sensível ao glyphosate, e esse herbicida pode ser um fungicida para alguns patógenos de plantas por causa de seu efeito na enzima-alvo. Assim, esse produto pode ter um benefício adicional em culturas resistentes a ele por atuar como fungicida contra alguns patógenos de culturas, especialmente fungos da ferrugem.

### Características gerais

- Apresentam espectro de controle muito amplo; praticamente não há seletividade.
- Em subdoses, frequentemente estimulam o crescimento (hormesis) das plantas, sobretudo de plantas lenhosas.



**FIG. 1.11** Rota de atuação do glyphosate inibindo a enzima 5-enolpiruvilchiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs) na via do chiquimato e bloqueando a síntese de fenilalanina, tirosina e triptofano

Fonte: adaptado de Helander, Saloniemi e Saikkonen (2012).

# 2 | RETENÇÃO, ABSORÇÃO, TRANSLOCAÇÃO E METABOLISMO DE HERBICIDAS EM PLANTAS

*Kassio Ferreira Mendes  
Kamila Cabral Mielke  
Leonardo D'Antonino  
Antonio Alberto da Silva*

A atividade biológica de um herbicida na planta é função da retenção, absorção, translocação, metabolismo e sensibilidade da planta ao herbicida e/ou a seus metabólitos. Por isso, o simples fato de um herbicida atingir as folhas da planta ou ser aplicado no solo onde ela se desenvolve não é suficiente para que ele exerça a sua ação; ele deve penetrar na planta, se translocar e atingir a organela onde irá atuar. A atrazine, por exemplo, quando aplicada no solo, penetra pelas raízes, se transloca até as folhas e aí atinge e penetra nos cloroplastos, destruindo-os. Por outro lado, o 2,4-D precisa ser absorvido, translocado e ainda metabolizado para exercer sua ação herbicida.

Os herbicidas podem penetrar nas plantas através das suas estruturas aéreas (folhas, caules, flores e frutos) e subterrâneas (raízes, rizomas, estolões, tubérculos etc.), de estruturas jovens como radículas e caulículo, e também pelas sementes. A principal via de penetração dos herbicidas na planta é função de uma série de fatores intrínsecos e extrínsecos (ambientais) a ela. Quando os herbicidas são aplicados diretamente na parte aérea da planta (pós-emergência), as folhas são a principal via de penetração. Por sua vez, as raízes, as estruturas jovens das plântulas (radícula e caulículo) e as sementes são as vias de penetração mais importantes para os herbicidas aplicados e/ou incorporados ao solo. O caule

(casca) de árvores ou arbustos também pode ser uma via de penetração de herbicidas, sobretudo quando se deseja controlar apenas algumas plantas dentro de uma população mista, ou quando, em um reflorestamento, se deseja que as cepas das árvores não rebrotem após a derrubada.

A absorção de herbicidas pelas raízes ou pelas folhas é influenciada pela disponibilidade dos produtos nos locais de absorção e pelos fatores ambientais (temperatura, luz, umidade relativa do ar e umidade do solo), os quais influenciam a translocação dos produtos até o local de ação.

Dessa forma, o comportamento do herbicida na planta detalhado neste capítulo é fundamental na eficiência de controle de plantas daninhas, na seletividade do composto às culturas agrícolas e como mecanismo de resistência das plantas daninhas, não relacionado ao local de ação do herbicida.

## **2.1 RETENÇÃO E ABSORÇÃO DE HERBICIDAS PELA PLANTA**

### **2.1.1 Retenção e absorção foliar**

A retenção de um herbicida é a máxima permanência das gotículas na superfície de uma planta, necessária para maximizar a distribuição do herbicida, determinando a quantidade de ingrediente ativo disponível para

reflorestamento, usando imazapyr de 20 a 30 dias antes da derrubada das árvores de eucalipto, visando evitar a rebrota das cepas. No entanto, plantas de eucalipto tratadas com o imazapyr promovem exsudação radicular do herbicida. Devido à grande persistência desse herbicida em alguns solos, os resíduos exsudados têm causado intoxicação nas mudas após o transplante, quando da reforma da floresta. Com o objetivo de contornar o problema, algumas empresas têm feito a aplicação de glyphosate na rebrota, desde que a altura dos ramos esteja entre 40 cm a 90 cm, o que permite maior absorção e translocação do herbicida por causa da maior área foliar, garantindo controle eficiente (Machado et al., 2010).

Processo menos utilizado, mas também eficiente, é a aplicação do glyphosate no toco imediatamente após o corte das árvores. Contudo, a eficiência do herbicida é muito diminuída caso a aplicação ultrapasse 24 horas após a derrubada, pois a formação de calose na ferida impede a penetração do glyphosate nos tecidos dos tocos.

### 2.1.3 Absorção pelas raízes

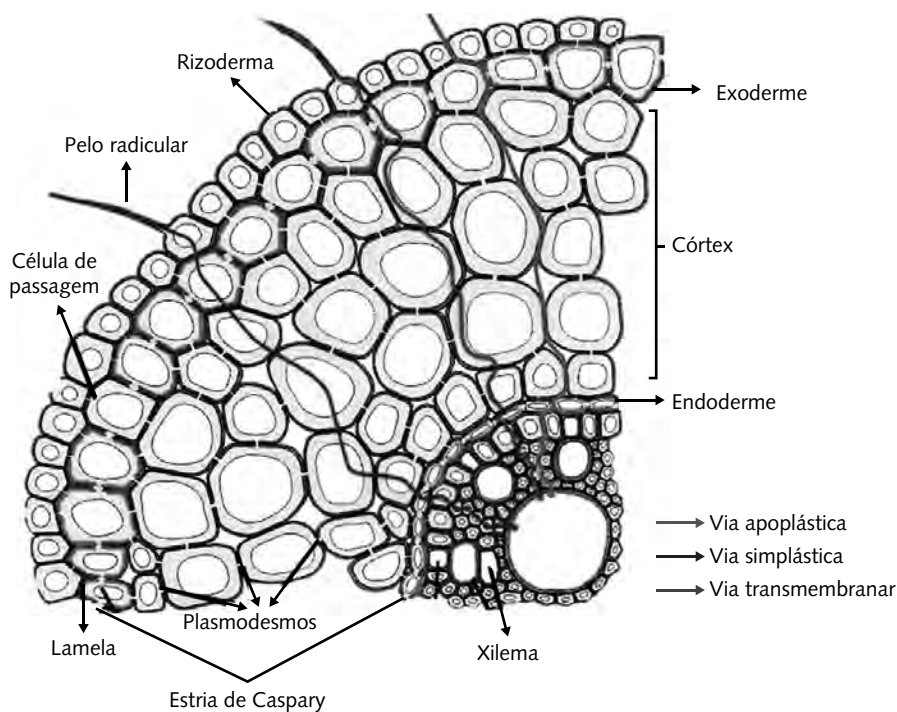
Muitos herbicidas aplicados ao solo são absorvidos pelas raízes. Essa entrada não é tão limitada quanto pelas folhas, uma vez que nenhuma camada significativa de cera ou cutícula está presente nas partes das raízes, onde a maior parte de absorção de herbicidas ocorre (Reis et al., 2021). A rota mais importante de entrada é a passagem do

herbicida junto com a água através dos pelos radiculares existentes nas extremidades das raízes. Os pelos radiculares são responsáveis pelo aumento significativo da área disponível à absorção de água, sais e herbicidas.

A disponibilidade dos herbicidas às raízes é função das propriedades físico-químicas dos herbicidas e do solo e da distribuição espacial desses compostos e das raízes no solo. Os herbicidas devem entrar em contato com a raiz, o que pode ocorrer pelo crescimento dela ou pela difusão do herbicida no estado gasoso e/ou em solução com a água até a zona de absorção das raízes. Muitos herbicidas com estruturas moleculares, tamanhos e solubilidades diferentes são prontamente absorvidos pelas raízes.

O sistema radicular das plantas superiores apresenta uma superfície de absorção extremamente grande, com alta permeabilidade à água e a solutos (sais). Embora as raízes jovens sejam cobertas por uma camada cerosa e as mais velhas sejam fortemente suberizadas, normalmente ainda ocorre a penetração de água e solutos.

Alguns herbicidas são absorvidos pelas raízes e tendem a permanecer nas membranas e nos corpos lipídicos da epiderme, enquanto herbicidas com alguma solubilidade em água podem se mover por três vias principais em direção ao sistema vascular da planta: a apoplástica, a simplástica e a apossimplástica (transmembranar) (Fig. 2.3). A via apoplástica fornece uma rota através de espaços



**FIG. 2.3** Seção transversal de uma raiz, mostrando suas principais estruturas. A via apoplástica fornece um caminho poroso, mas pode ser interrompido pelas estrias de Caspary na endo e na exoderme, apesar de ainda haver alguma passagem de água e solutos através delas. A via simplástica se dá através dos plasmodesmos e do citosol das células

Fonte: adaptado de Steudle (2000).

# 3 | EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS A HERBICIDAS

*Kassio Ferreira Mendes*

*Kamila Cabral Mielke*

*Ricardo Alcántara de La Cruz*

*Antonio Alberto da Silva*

*Evander Alves Ferreira*

*Leandro Vargas*

O controle químico de plantas daninhas é o método mais utilizado no mundo, por ser muito eficiente, ter custo relativamente baixo comparado aos outros métodos de controle, ser de fácil utilização e profissionalmente adequado. Todavia, a maioria dos produtores possui apenas uma visão imediatista e econômica sobre o controle das plantas daninhas, o que pode gerar problemas ambientais a médio e longo prazo. Aplicações repetidas de herbicidas com o mesmo mecanismo de ação têm sido prática comum em várias partes do mundo. Devido à alta pressão de seleção contínua na maioria dos casos, muitas populações de plantas daninhas têm selecionado resistência a herbicidas em várias regiões agrícolas e não agrícolas do mundo (Heap, 2014; Peterson et al., 2018; Buerge et al., 2020).

A resistência a herbicidas é a capacidade hereditária das plantas daninhas de crescer e se reproduzir após exposição, em condições de campo, a uma dose de herbicida recomendada pelo fabricante que é letal aos indivíduos silvestres (suscetíveis) da mesma espécie (Vencill et al., 2012). Por causa da evolução dessa resistência, o controle de plantas daninhas tem se tornado um problema de difícil manejo em diversas áreas de agricultura intensiva. A resistência é conferida por características genéticas que, além de permitir que os indivíduos de uma população de

plantas daninhas sobrevivam à exposição de um herbicida, conforme já reportado, ainda os dotam de forte vantagem competitiva sobre indivíduos suscetíveis, permitindo-lhes dominar a população (Powles; Preston, 1998).

O processo de evolução da resistência a herbicidas passa por três estádios (Vila-Aiub, 2019; Vila-Aiub; Yu; Powles, 2019):

- a] eliminação de biótipos altamente sensíveis, restando apenas os mais tolerantes e resistentes;
- b] eliminação de todos os biótipos, exceto os resistentes, e seleção dos indivíduos homozigotos dentro de uma população com alta tolerância;
- c] inter cruzamento entre os biótipos sobreviventes, gerando novos indivíduos com maior grau de resistência, os quais podem passar por nova seleção posterior.

O estudo da resistência de plantas daninhas a herbicidas assume grande importância quando não existem ou existem poucos herbicidas alternativos para serem usados no controle dos biótipos resistentes. Isso acontece em espécies de grande ocorrência em diversas partes do mundo, tornando cada vez mais difícil e oneroso o controle desses biótipos. Atualmente, são 513 casos únicos de resistência (espécie × mecanismo de ação) em 267

(Trezzi et al., 2009, 2011; Rojano-Delgado et al., 2019; Mendes et al., 2020a, 2020b, 2020c).

### 3.2 FATORES QUE FAVORECEM O SURGIMENTO DA RESISTÊNCIA

#### 3.2.1 Pressão de seleção

A pressão de seleção imposta pelo uso contínuo da mesma prática agrícola é o que permite que os indivíduos resistentes sobrevivam, produzam sementes e, assim, ocupem os nichos disponíveis no ambiente, deixados pelas plantas suscetíveis que são controladas pelo herbicida (Christoffoleti et al., 2016). A utilização frequente de herbicidas proporciona a seleção das espécies de plantas que são gradualmente purificadas (seleção intraespecífica) durante o tempo, até se tornarem mais adaptadas.

Os indivíduos sensíveis de determinada espécie são primeiro eliminados com a aplicação do herbicida. Raramente, uma planta daninha individual desenvolve uma mutação que confere resistência a um herbicida ou grupo de herbicidas, sobrevive e se reproduz; isso acontece após várias gerações ao longo do tempo e seleção repetida com herbicidas iguais ou semelhantes e, como consequência, o biótipo resistente pode se tornar dominante na população (Fig. 3.7) (Qasem, 2013). Pode-se observar que qualquer prática agrícola exerce pressão de seleção e pode se tornar problemática para os agricultores, quando aplicada repetidamente por um longo período.

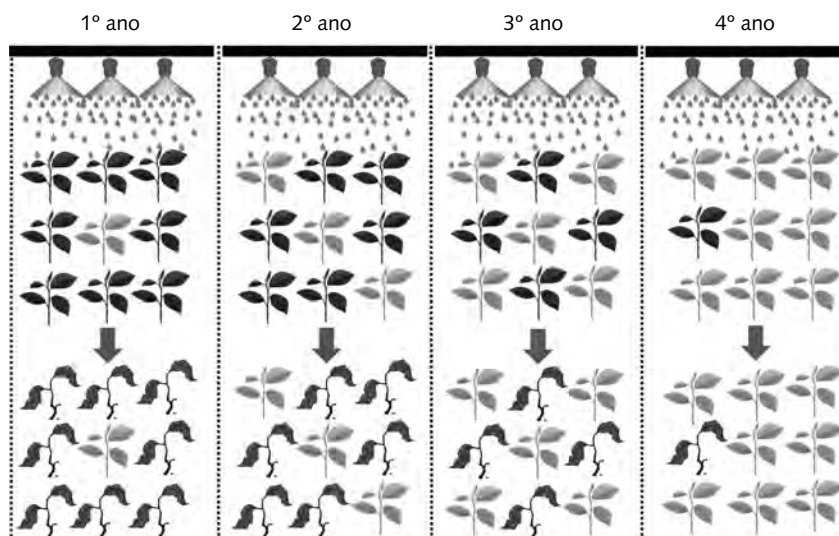
#### 3.2.2 Variabilidade genética

A variabilidade genética naturalmente encontrada nas plantas daninhas, associada à adequada intensidade

e duração de seleção, torna inevitável o surgimento de plantas resistentes. O(s) gene(s) que confere(m) a resistência a determinado herbicida pode(m) estar presente(s) em uma população antes mesmo que esse herbicida seja lançado no mercado. A maior evidência disso foi constatada com *A. myosuroides* a partir de plantas de um herbário da França coletadas em 1888, em que um indivíduo apresentou a mutação Ile-1781-Leu em sua forma heterozigota, amplamente relatada como responsável por conferir resistência aos inibidores da ACCase (Délye; Deulvot; Chauvel, 2013). No entanto, a presença dessa mutação ocorreu 90 anos antes de esse grupo de herbicidas ser desenvolvido e usado pela primeira vez.

Toda população natural de plantas daninhas contém biótipos resistentes a herbicidas que se apresentam indiferentes à aplicação de algum outro herbicida (HRAC, 1998a). Geneticamente, há dois caminhos para o aparecimento de plantas resistentes: pela ocorrência de um gene ou de genes que confirmam a resistência em frequência muito baixa na população, ou por uma mutação (Mortimer, 1998).

O gene ou os cromossomos mutantes são fonte essencial de toda a variação genética (Silva; Vargas; Ferreira, 2007). A seleção altera as proporções entre as plantas sensíveis e resistentes. A possibilidade de ocorrer resistência em uma população por causa da mutação é resultado da relação entre a frequência da mutação e o tamanho da população. Características das plantas daninhas como alta diversidade genética, baixa dormência das sementes e grande produção de pólen e propágulos, aliadas ao monocultivo e ao uso repetido do controle



**FIG. 3.7** Aumento da frequência de biótipos resistentes de plantas daninhas ao longo dos anos, devido a aplicações repetidas do mesmo herbicida. As plantas daninhas com cores verde-escuro, verde-claro e marrom representam biótipos suscetíveis, resistentes e mortos, respectivamente

Fonte: adaptado de Christoffoleti e Nicolai (2016).

et al., 2013). Esses sistemas poderiam eliminar diretamente as EROs ou complementar outros mecanismos de resistência a herbicidas em um conjunto complexo de processos coordenados (Maroli et al., 2015). Os diferentes fitoquímicos e enzimas sintetizados como defesa antioxidante são produzidos nas folhas e protegem a planta contra danos, saciando os radicais livres. As plantas com alta capacidade antioxidante são mais tolerantes ao estresse foto-oxidativo induzido por herbicidas do que plantas com baixa capacidade antioxidante (Arora; Sairam; Srivastava, 2002). Em vários biótipos de aveia (*Avena fatua*) resistentes a herbicidas, por exemplo, foram identificadas enzimas com expressão elevada relacionadas ao potencial redox. Tal fato sugere que essas plantas exibem uma alta capacidade de manutenção redox, uma vez que são resistentes a 11 herbicidas de cinco mecanismos de ação diferentes (Keith et al., 2017). Esse tipo de resistência a vários herbicidas representa uma ameaça à agricultura sustentável e preocupa os cientistas, desenvolvedores de herbicidas e agricultores.

### 3.6 PRÁTICAS PARA EVITAR A RESISTÊNCIA

Antes que as falhas de controle apareçam na lavoura, práticas podem ser implantadas a fim de minimizar o risco do surgimento de plantas resistentes. O Quadro 3.3 apresenta algumas delas, e os consequentes riscos de evolução da resistência.

A principal medida para prevenir ou reduzir o risco de evolução da resistência a herbicidas é minimizar a pressão de seleção e controlar os indivíduos resistentes antes que eles possam se multiplicar. Isso pode ser alcançado com a adoção das seguintes práticas:

- a] Usar herbicidas com diferentes mecanismos de ação.
- b] Realizar aplicações sequenciais de herbicidas e/ou misturas de herbicidas com diferentes mecanismos de ação.
- c] Realizar rotação de mecanismos de ação.
- d] Limitar o número de aplicações de um herbicida da mesma família ou mecanismos de ação dentro de uma única safra.
- e] Aplicar os herbicidas nas doses de registro e no estágio de desenvolvimento da planta daninha recomendados na bula do produto.
- f] Usar herbicidas com menor pressão de seleção (residual e eficiência).
- g] Rotacionar o plantio de culturas.
- h] Rotacionar os métodos de controle de plantas daninhas.
- i] Acompanhar mudanças na flora.
- j] Usar sementes certificadas e impedir a introdução de novas plantas daninhas nas áreas agrícolas.
- k] Rotacionar o método de preparo do solo.
- l] Limpar os equipamentos antes de movimentá-los entre os talhões para minimizar a dispersão das sementes de plantas daninhas.
- m] Manter as áreas livres de plantas daninhas durante o período sem cultivo.

A utilização de herbicidas com diferentes mecanismos de ação em rotações anuais, misturas de tanques e aplicações sequenciais pode atrasar a evolução da resistência, minimizando a pressão de seleção imposta às populações de plantas daninhas por um único mecanismo de ação específico (Norsworthy et al., 2012). As

**Quadro 3.3** Risco de evolução da resistência, de acordo com as práticas de cultivo

Opção de manejo	Risco de resistência		
	Baixo	Médio	Alto
Mecanismo de ação do herbicida usado	Mais que dois mecanismos	Dois mecanismos	Um mecanismo
Mistura de herbicidas	Mais que dois mecanismos	Dois mecanismos	Um mecanismo
Método de controle	Cultural, mecânico e químico	Cultural e químico	Químico
Rotação de cultura	Completa	Limitada	Nenhuma
Infestação de plantas daninhas	Baixa	Média	Alta
Controle nos últimos três anos	Bom	Declinando	Ruim

Fonte: adaptado de HRAC (1998a).

# 4 | DINÂMICA E DESTINO DE HERBICIDAS NO SOLO

*Antonio Alberto da Silva*

*Kassio Ferreira Mendes*

*Leonardo d'Antonino*

*Gustavo Antônio Mendes Pereira*

*Kamila Cabral Mielke*

*Rubem Silvério de Oliveira Júnior*

O uso do controle químico em plantas daninhas constitui-se prática indispensável na agricultura em larga escala, tornando-se indiscutível a utilização de herbicidas no sistema agrícola. No entanto, é fundamental que eles sejam adequadamente aplicados, para que seja preservada a qualidade final dos produtos colhidos, bem como dos recursos naturais que sustentam a produção, especialmente o solo e a água (Silva et al., 2014).

Nos últimos anos, observa-se maior preocupação quanto à contaminação do ambiente e à utilização racional dos recursos hídricos e do solo. As práticas agrícolas, entretanto, são responsáveis por grande parte da degradação desses recursos. Estudo analisando a eficácia da deposição de pesticidas no alvo mostrou que 60% a 70% do total dos pesticidas aplicados nos campos agrícolas não atingem a superfície-alvo de interesse (Law, 2001) e acabam alcançando direta ou indiretamente o solo, o qual atua como o principal receptor e acumulador desses compostos.

Ao atingirem o solo, inicia-se o processo de redistribuição e degradação dos herbicidas aplicados, o qual pode ser extremamente curto, como ocorre para algumas moléculas simples e não persistentes, ou perdurar

por meses ou anos em compostos altamente persistentes. O tempo de permanência dessas moléculas no ambiente depende, entre outros fatores, da capacidade de sorção do solo, da dinâmica do fluxo hídrico e do transporte de solutos, além da sua taxa de degradação, a qual está relacionada à atividade microbológica, biodisponibilidade e recalcitrância do herbicida.

Os estudos envolvendo a sorção de herbicidas em solos brasileiros são fundamentais para a avaliação da eficiência de controle das plantas daninhas, pois existe nos trópicos grande diversidade de solos, além de diferentes índices de sorção que podem comprometer a eficiência e o impacto ambiental do herbicida. Com isso, cresce a importância do entendimento do destino final dessas moléculas e do estudo do comportamento no ambiente onde são aplicados esses compostos.

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos relacionados ao comportamento de herbicidas no solo, juntamente com os processos envolvidos na dissipação desses compostos no ambiente. Os exemplos apresentados destacam os estudos mais relevantes com herbicidas em solos, permitindo maior compreensão da sua dinâmica e seu destino.



(1990) para o Brasil, o coeficiente de sorção  $K_f$  é considerado nas análises de capacidade de sorção de herbicidas no solo. Sua classificação varia de pequena a elevada e reflete parcialmente a capacidade de movimento e persistência do composto no ambiente (Tab. 4.1). Entretanto, por haver inúmeros interferentes nos estudos de sorção a campo e em laboratório, verifica-se que outras avaliações são necessárias para a definição do real comportamento dos herbicidas no solo.

**Tab. 4.1** Classificação da capacidade de sorção de produtos químicos no solo

$K_f$	Classificação da sorção
0-24	Baixa
25-49	Média
50-149	Grande
> 150	Elevada

Fonte: Ibama (1990).

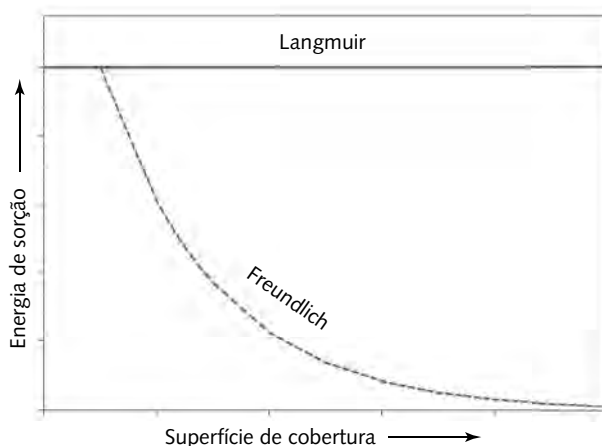
Já o *modelo de Langmuir* baseia-se na pressuposição de que a sorção ocorre em superfícies planas que apresentam número fixo de grupos funcionais, e que cada um desses grupos interagirá com uma molécula do adsorvato. Quando todos os grupos funcionais estiverem preenchidos, tem-se a sorção máxima. A energia de sorção é a mesma em todos os sítios e independe da cobertura de superfície (Fig. 4.9). Esse modelo é expresso pela Eq. 4.6:

$$(C_s) = (C_m) \frac{K_1 C_e}{1 + K_1 C_e} \quad (4.6)$$

em que  $C_m$  representa a quantidade máxima do herbicida adsorvido ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $C_e$  é a concentração de equilíbrio do herbicida na solução ( $\text{mg mL}^{-1}$ ) e  $K_1$  é o coeficiente de sorção do modelo de Langmuir.

#### 4.2.5 Principais propriedades do solo que influenciam a sorção de herbicidas

Em geral, a sorção de herbicidas de caráter básico e não iônico ao solo aumenta com o incremento da CTC (capacidade de troca catiônica), da área superficial específica das partículas coloidais da fração argila e, principalmente, dos teores de carbono orgânico do solo (Oliveira Jr. et al., 1999). No entanto, o pH e a mineralogia do solo em



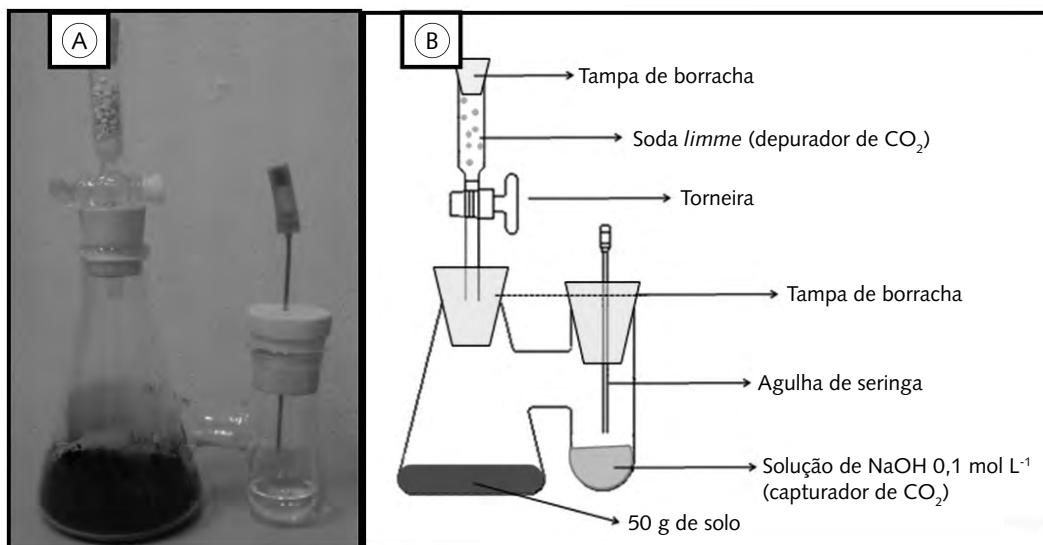
**Fig. 4.9** Modelo da energia de sorção em função da superfície de cobertura, segundo as isotermas de Langmuir e Freundlich

questão são os atributos de maior importância na sorção dos herbicidas de caráter ácido (Guo et al., 2003; Oliveira Jr.; Regitano, 2009).

#### Matéria orgânica do solo

Em solos tropicais e subtropicais altamente intemperizados, a matéria orgânica tem grande importância nos processos de retenção de cátions e complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes (Stevenson, 1994). É responsável também pela estabilidade da estrutura do solo e infiltração de água, aeração e atividade da biomassa microbiana, constituindo-se num componente fundamental da sua capacidade produtiva (Santos; Camargo, 1999).

A matéria orgânica e o pH dos solos são os atributos que mais influenciam a atividade dos herbicidas registrados para uso em solos tropicais. A matéria orgânica interfere em todos os processos sortivos que podem ocorrer, principalmente nos herbicidas recomendados em pré-emergência de característica não iônica ou de caráter básico; e o pH comanda a sorção dos herbicidas ácidos nos solos intemperizados e com baixo teor de matéria orgânica (Oliveira Jr.; Koskinen; Ferreira, 1999; Takeshita et al., 2019). Thompson et al. (1984), avaliando a persistência do herbicida 2,4-D no solo, verificaram que em solos com alto teor de matéria orgânica e baixo pH a lixiviação do produto foi menor, caracterizando a grande influência do pH e da matéria orgânica também na sorção de herbicidas ácidos. Mallawatantri e Mulla (1992)



**FIG. 4.21** Representação esquemática de um frasco biométrico com 50 g de solo e solução de NaOH ( $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) adicionada na alça lateral

Fonte: adaptado de Dias (2012).

em rotação à cultura anterior. Eventuais alternativas visando minimizar o problema do *carryover* incluem a redução das doses (pode não resolver o problema em certos tipos de solos) ou o cultivo de plantas que possuem a capacidade de remediar solos contaminados (Santos et al., 2006; Carmo et al., 2008; Silva et al., 2012).

As principais formas pelas quais os herbicidas são degradados no ambiente estão descritas a seguir.

#### 4.4.2 Degradação química

Nesse caso, a degradação ou decomposição de herbicidas no solo ocorre por meio de reações químicas, e não biológicas. Esse tipo de degradação é comum em diversas moléculas, e os principais mecanismos envolvidos são a oxirredução e a hidrólise desses compostos. A hidrólise representa um processo geral de reação do herbicida com a água, no qual ocorre a quebra de ligações químicas das moléculas herbicidas devido à substituição de um ou mais átomos por íons hidroxil da água ( $\text{OH}^-$ ). Esse fenômeno pode ocorrer em solos extremamente secos, embora seja facilitado em condições que se aproximem de sua capacidade de campo e com temperaturas elevadas. O pH do solo também auxilia a velocidade da reação, cujo efeito irá variar conforme a classe do herbicida (ácidos e bases fracas ou não iônicos).

Embora na grande maioria dos herbicidas aplicados ao solo os processos de degradação mediados por micror-

ganismos sejam mais importantes, a hidrólise química é responsável pelo início de uma série de atividades degradativas que ocorrem no solo, e torna-se indispensável nos processos de transformação das moléculas de herbicidas no solo (Javaroni; Landgraf; Rezende, 1999). Todavia, as imidazolinonas, por exemplo, são extremamente estáveis nas faixas de pH encontradas no solo e, no geral, apresentam  $t_{1/2}$  maior que seis meses. A estabilidade desses herbicidas sugere que a hidrólise química não é um mecanismo importante na sua degradação no solo (Shaner, 1989).

Nas Figs. 4.22 a 4.28 são apresentados os sintomas de injúria por herbicidas pertencentes a vários grupos químicos em diversas espécies vegetais de grande importância econômica e social no Brasil.

#### 4.4.3 Degradação biológica (microbiana) ou biodegradação

O termo biodegradação refere-se à transformação biológica de um composto químico orgânico em outra forma. Essa transformação pode ser primária, envolvendo mudanças estruturais na molécula, como uma oxidação, redução ou perda de um grupo funcional, ou mais complexa, envolvendo várias reações sequenciais, implicando a perda ou alteração da toxidez da molécula. Estudos mais detalhados indicam que a biodegradação pode ocorrer por:

# 5 | DESAFIOS E AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO DE HERBICIDAS

*Francisco Cláudio Lopes de Freitas*

*Lino Roberto Ferreira*

*Wendel Magno de Souza*

*Hugo Marcus Fialho e Moraes*

*Maria Carolina Gomes Paiva*

A demanda cada vez maior por alimentos, fibras e energia destaca a importância do controle de agentes nocivos às culturas, como insetos, patógenos e plantas daninhas. Esse controle pode ser alcançado a partir do uso de variadas estratégias, envolvendo controle químico, preventivo, cultural, mecânico, físico e biológico, sendo o químico o mais utilizado na agricultura.

No caso específico das plantas daninhas, o controle químico é realizado por meio de herbicidas, cuja aplicação requer conhecimentos de diversos fatores que interagem entre si, como as características dos herbicidas (formulação, translocação na planta, compatibilidade com outros produtos e toxicidade), das plantas daninhas (biologia, exposição e estágio de maior suscetibilidade) e da cultura (porte e arquitetura foliar, estágio de desenvolvimento e camada cerosa nas folhas), as condições ambientais (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, ocorrência de chuvas, orvalho), os equipamentos utilizados na aplicação e as condições operacionais (tipo de pulverizador, aplicação aérea ou terrestre, assistência de ar, pressão de trabalho e pontas de pulverização) e uso de adjuvantes (surfactantes, redutores de deriva, adesivos etc.).

Uma vez constatada a necessidade do uso, os herbicidas devem ser aplicados de forma correta, visando

a máxima eficácia biológica e o mínimo de danos às culturas vizinhas, ao meio ambiente e ao homem. Essa eficácia será tanto maior quanto mais adequados forem os equipamentos e as técnicas empregadas. Nesse sentido, a tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas consiste no emprego de todos os conhecimentos científicos que proporcionem a deposição correta do produto biologicamente ativo no alvo no momento adequado, na quantidade necessária, de forma econômica e com o mínimo de contaminação ambiental (Matuo; Pio; Ramos, 2002), com o objetivo de obter boa eficiência da aplicação, mantendo a produtividade das culturas.

Nos últimos anos, o grande desenvolvimento tecnológico propiciou avanços consideráveis em diversos segmentos ligados à aplicação de herbicidas, como a aplicação aérea por meio de aeronaves remotamente pilotadas (do inglês *remotely piloted aircraft*, RPA) (drones) e a eletrônica embarcada nos pulverizadores, a qual permite monitorar as pulverizações em campo, tornando a aplicação mais precisa, com maior qualidade e segurança ambiental. Entre os recursos disponíveis, podem-se destacar o piloto automático, o controle eletrônico de altura de barra, o fechamento automático de seções, a aplicação em taxas variadas e os sensores de presença de plantas daninhas.

### 5.7.8 Pulverizadores de aplicação aérea

Os pulverizadores aéreos são alternativa interessante para aplicação de herbicidas e outros insumos em áreas extensas, de difícil acesso, bem como em lavouras de porte alto. Além disso, possibilitam operação em qualquer condição de umidade do solo, ausência de danos por amassamento e não disseminação de propágulos, por não entrarem em contato direto com a área tratada.

No Brasil, a aviação agrícola é uma atividade regada pelo Decreto nº 8.806, de 22 de dezembro de 1981 (Brasil, 1981), que regulamenta o Decreto-Lei nº 917, de 7 de outubro de 1969, e está submetida à fiscalização do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa). De acordo com essa legislação, as atividades da aviação agrícola compreendem as aplicações de herbicidas, a distribuição de fertilizantes, semeadura, povoamento de águas e combate a incêndios em campos florestais e outros empregos que vierem a ser aconselhados (Carvalho; Cunha, 2019). Segundo o Sindicato Nacional das Empresas de Aviação Agrícola (Sindag,

2021), o Brasil conta com aproximadamente 2.350 aeronaves agrícolas, das quais aproximadamente 65% são de empresas prestadoras de serviços e as demais, de operadores privados.

Pilotos de aeronaves agrícolas devem realizar cursos de capacitação específicos com conhecimentos técnicos e práticos de cunho agrônomico e aeronáutico sob orientação de profissionais credenciados para obtenção da habilitação, o que proporciona maior segurança em termos de condução da aeronave e de aplicação dos produtos.

#### Avião agrícola

De forma geral, ao contrário do que a maioria pensa, o avião agrícola (Fig. 5.15A) possui sistema de pulverização mais simples do que o de um pulverizador terrestre. Como exemplo, uma aeronave Ipanema possui os seguintes componentes: *hopper* (depósito de insumos), bomba, válvula de três vias (*bypass*), válvula de abastecimento rápido, manômetro, filtros e barras de aplicação (Carvalho; Cunha, 2019). O tanque/*hopper* utilizados em



FIG. 5.14 Exemplo de pulverizador autopropelido

Fonte: Jacto (2020).



FIG. 5.15 (A) Avião agrícola com barra do pulverizador montada sob a asa e (B) e detalhe mostrando a hélice que aciona a bomba centrífuga localizada sob a fuselagem da aeronave, movida por energia eólica gerada pelo movimento da aeronave

Fonte: Francisco Cláudio Lopes de Freitas.

(diafragma) vedando a câmara, não permitindo que a extremidade do pistão entre em contato com a calda. Existem opções no mercado que já vêm com a câmara de compensação incorporada à bomba; caso contrário, será necessária a instalação da câmara na linha de pulverização.

### Bomba de roletes

Esse modelo possui de cinco a oito cavidades dentro da carcaça da bomba, espaçadas de forma simétrica, onde há um rolete (cilindro pequeno) em cada uma que se move para dentro e para fora, proporcionando pressão do líquido contra a parede, o qual é forçado através do orifício de saída. No geral apresenta tamanho mais compacto em relação aos demais tipos de bomba. Alguns modelos atingem até 20 bar de pressão e vazões de 140 L min<sup>-1</sup>.

#### 5.8.6 Câmara de compensação

Também chamada de câmara de amortecimento, tem a função de eliminar as pulsações de pressão provocadas nas bombas de pistão. Instalada no circuito após a bomba, é essencial em pulverizadores de pequeno porte com bomba de um pistão e em máquinas com controlador eletrônico, já que as pulsações são captadas pelo sensor, o que impossibilita a correta medição do fluxo gerado no sistema de pulverização.

#### 5.8.7 Manômetro

Os manômetros são instrumentos que indicam a pressão de trabalho, a qual pode ser medida em várias unidades,

como bar, libras por polegada<sup>2</sup> (psi), kilopascal (kPa) e kg cm<sup>-2</sup>. No entanto, a maioria dos pulverizadores indica a pressão em bar ou psi, sendo que 1,0 bar = 14,504 psi.

As normas técnicas definem que os manômetros devem ser dimensionados para leitura na faixa de 25% a 75% de sua escala. Isso significa que um manômetro de 0 a 35 bar é indicado para leituras entre 7 e 26 bar. Como a maioria das pontas de pulverização utilizadas na aplicação de herbicidas opera nas pressões entre 1 e 7 bar (14,5 e 105 psi), os manômetros mais indicados para essa condição são aqueles com leituras entre 0 a 10 bar ou 0 a 150 psi. No entanto, a maioria dos pulverizadores trato-rizados vem da fábrica com manômetros de 0 a 35 bar, dificultando a leitura de baixas variações na pressão. Se esse for o caso, eles devem ser substituídos. Entretanto, há também manômetros que possuem a escala estendida, isto é, grandes intervalos de até aproximadamente 50% da escala, dando maior precisão na leitura da pressão.

#### 5.8.8 Válvulas reguladoras de pressão

Um dos maiores problemas verificados em aplicações realizadas com o pulverizador costal manual é a falta de uniformidade da pressão, que leva a variações na dose do defensivo agrícola. Esse problema pode ser contornado mediante o uso de válvulas reguladoras de pressão, as quais permitem ao operador manter a pressão constante durante a aplicação, evitando oscilações que ocorrem nos diferentes ciclos do pistão (Fig. 5.21A).

Existem no mercado diferentes tipos de válvulas reguladoras, entretanto, as mais utilizadas atualmente

