

*Kassio Ferreira Mendes*

---

ORGANIZADOR

**PLANTAS  
DANINHAS**  
avanços  
tecnológicos  
volume 3

## Prefácio

Mesmo após dois volumes referentes às plantas daninhas, o tema ainda não se esgotou. Pelo contrário, a ciência aplicada das plantas daninhas está em constante evolução, conforme mais descobertas são feitas acerca dos mecanismos de sobrevivência das plantas que têm o infortúnio de se tornar indesejáveis na produção agrícola. Nesse contexto, *Plantas daninhas: avanços tecnológicos* explora algumas temáticas mais recentes dessa área, nunca perdendo de vista o principal objetivo do produtor: manter a produtividade da cultura de interesse e controlar a presença das plantas daninhas de maneira sustentável.

Os herbicidas são uma das mais importantes ferramentas no controle das plantas daninhas na agricultura moderna, e são aplicados com tanta frequência que tanto plantas-alvo quanto as não alvo estão constantemente expostas a doses subletais desses produtos no campo. Apesar desse efeito negativo, ainda é possível utilizar essa tecnologia de forma benéfica. Baixas doses de qualquer herbicida podem ser usadas para modular proveitosamente o crescimento, o desenvolvimento ou a composição da planta, devido ao efeito estimulador conhecido como hormese ou *hormesis*, objeto de estudo do primeiro capítulo desta obra.

Destaca-se, no segundo capítulo, a introdução das culturas geneticamente modificadas (GM) no mercado, que possuem resistência específica a determinados herbicidas, de forma a barrar uma das grandes limitações no uso desses produtos: a não seletividade de determinadas culturas ou a semelhança botânica entre a cultura e as plantas daninhas. As culturas GM propiciaram a aplicação desses produtos em pós-emergência das plantas de interesse sem causar injúrias à cultura. Após o surgimento de biótipos de plantas daninhas resistentes, nessas culturas resistentes a herbicidas também se elevou a possibilidade de rotação de herbicidas com diferentes mecanismos de ação, permitindo, assim, um manejo mais eficiente das plantas daninhas.

O terceiro capítulo aborda as várias possibilidades de interações entre herbicidas, ou mesmo com outros produtos aplicados em mistura no tanque do pulverizador, como inseticidas, fungicidas, fertilizantes foliares e adjuvantes. Essas interações podem gerar resultados positivos e negativos na eficácia do controle das plantas daninhas e na seletividade às culturas, portanto, devem ser estudadas com atenção, para que possam ser exploradas de forma benéfica à produção de interesse.

Tecnologia fundamental para a modernidade, a agricultura de precisão, detalhada no quarto capítulo, permite a visualização de atributos de interesse de forma espacializada de uma cultura, a partir de sensoriamento remoto, auxiliando na tomada de decisão sobre o manejo da lavoura, principalmente no que diz respeito às aplicações de herbicidas em pré- e pós-emergência para o controle de plantas daninhas.

Como já destacado no volume anterior, apesar de o controle químico das plantas daninhas ser altamente eficiente, o uso extensivo e impróprio dos herbicidas nas culturas promove grande impacto no ambiente, no solo e em organismos não alvo. Com o objetivo de melhorar esse cenário, o quinto capítulo explora as formas de remediação de solos contaminados por herbicidas, que se propõem a reduzir a toxicidade a partir da capacidade inerente de plantas e microrganismos em degradar ou imobilizar os herbicidas. Ambientalmente eficaz e com menor custo, a biorremediação de solos oferece a possibilidade de eliminar ou processar contaminantes orgânicos usando atividade biológica natural.

Apresentando várias tecnologias modernas referentes ao controle dessas plantas, *Plantas daninhas: avanços tecnológicos* é destinado a estudantes de graduação, pós-graduação, técnicos, professores, produtores rurais e a todos com interesse nessa área.

*Prof. Dr. Kassio Ferreira Mendes*  
Biologia e Manejo Integrado de Plantas Daninhas  
Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa  
Viçosa, Minas Gerais, Brasil

# SUMÁRIO

<b>1 Hormese induzida em plantas com subdoses de herbicidas.....</b>	<b>9</b>
1.1 Definição de hormese.....	9
1.2 Dose-resposta hormética de herbicidas em plantas cultivadas.....	10
1.3 Mecanismo de hormese em plantas.....	14
1.4 Efeito da hormese em plantas daninhas.....	15
1.5 Considerações finais.....	18
<b>2 Culturas geneticamente modificadas resistentes a herbicidas e controle de plantas daninhas .....</b>	<b>19</b>
2.1 Impactos da utilização de culturas geneticamente modificadas resistentes a herbicidas .....	20
2.2 Culturas geneticamente modificadas resistentes a herbicidas aprovadas para comercialização no Brasil .....	20
2.3 Mecanismo de resistência a herbicidas nas culturas geneticamente modificadas e controle das plantas daninhas.....	24
2.4 Plantas daninhas voluntárias resistentes a herbicidas.....	34
2.5 Relação entre as culturas geneticamente modificadas e a resistência das plantas daninhas no Brasil .....	36
2.6 Perspectivas futuras das culturas geneticamente modificadas resistentes a herbicidas .....	39
2.7 Considerações finais.....	40
<b>3 Adjuvantes, formulações e misturas de herbicidas em tanque de pulverização.....</b>	<b>41</b>
3.1 Adjuvantes .....	41
3.2 Formulações de herbicidas.....	47
3.3 Misturas de herbicidas .....	51
3.4 Considerações finais.....	64
<b>4 Mapeamento de plantas daninhas e aplicação de herbicidas no manejo de precisão baseado no sensoriamento remoto .....</b>	<b>66</b>
4.1 Aplicação de herbicidas em taxa variada (ATV) .....	66
4.2 Aplicação em taxa variada (ATV) na pré-emergência.....	70
4.3 Aplicação em taxa variada (ATV) na pós-emergência .....	73
4.4 Controladores de taxa variada.....	86
4.5 Utilização de <i>lasers</i> como alternativa ao uso de herbicidas .....	89
4.6 Considerações finais.....	93
<b>5 Remediação de solos contaminados por herbicidas.....</b>	<b>94</b>
5.1 Biorremediação microbiana dos herbicidas .....	94
5.2 Fitorremediação dos solos contaminados com herbicidas.....	97
5.3 Compostos orgânicos na remediação de herbicidas.....	106
5.4 Considerações finais.....	109
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>110</b>

# 1 Hormese induzida em plantas com subdoses de herbicidas

Kamila Cabral Mielke  
Maura Gabriela da Silva Brochado  
Dilma Francisca de Paula  
Kassio Ferreira Mendes

Os herbicidas são ferramentas importantes no controle das plantas daninhas na agricultura moderna, e tanto as espécies de plantas-alvo quanto as não alvo são frequentemente expostas a doses subletais desses compostos em condições de campo (Mobli; Matloob; Chauhan, 2020). Todos os herbicidas atuam em vias ou processos cruciais para a sobrevivência das plantas, de forma inibitória ou estimuladora. Baixas doses de qualquer herbicida podem ser usadas para modular benéficamente o crescimento, o desenvolvimento ou a composição da planta (Velini *et al.*, 2010), efeito estimulador conhecido como *hormese* ou *hormesis*. Para a sua ocorrência, são requeridas doses de herbicida abaixo da concentração-limite capaz de causar injúrias às plantas (Belz; Duke, 2014).

O termo *hormesis* é derivado do grego “hormo” (“excitar”) e tem origem toxicológica, que se refere à resposta bifásica de certo elemento após exposição a um agente considerado tóxico. Ou seja, existem dois possíveis comportamentos nesse fenômeno: o estímulo ou efeito benéfico em doses baixas, e a inibição ou efeito tóxico em doses altas (Mattson, 2008; Murado; Vásquez, 2010; Marques, 2019).

Inicialmente, vários herbicidas foram desenvolvidos como reguladores de crescimento de plantas, comprovando a hipótese de hormese (Silva *et al.*, 2012a). Herbicidas à base de auxinas são exemplos bem conhecidos de produtos químicos que, em concentrações não tóxicas, aumentam o crescimento mimetizando a auxina, hormônio de crescimento, mas que são letais em doses mais elevadas (Américo; Américo-Pinheiro; Furlani Jr., 2017; Marques, 2019). Outro exemplo é o próprio glyphosate, cujo antecessor, o glyphosine (hoje utilizado no Brasil como maturador), ainda é utilizado como regulador de crescimento em vários países (Halter, 2009; Silva *et al.*, 2012a).

Apesar de inúmeras teorias sobre a causa da hormese, poucos estudos têm sistematicamente avaliado a sua frequência, magnitude e distribuição entre os produtos químicos sobre as plantas, e menos ainda têm comparado as curvas de dose-resposta (Cedergreen, 2008; Pinheiro, 2020).

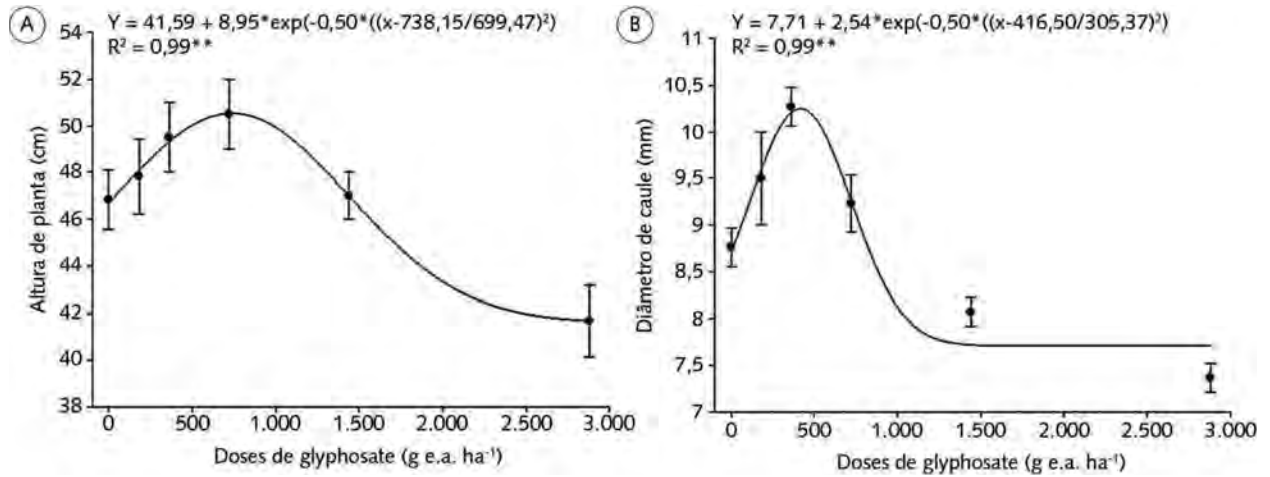
Dessa forma, neste capítulo serão abordados a definição de hormese, a dose-resposta hormética de herbicidas em plantas cultivadas e o mecanismo de hormese na planta. Por fim, discute-se o efeito de hormese em plantas daninhas, que também é muito importante para todos os profissionais envolvidos na área da ciência e manejo dessas espécies.

## 1.1 Definição de hormese

O termo *hormese* ou *hormesis* é amplamente conhecido no campo da Toxicologia. É um fenômeno comum na maioria das espécies de plantas e com diferentes tipos de agentes tóxicos, entre eles os herbicidas, sendo influenciado por fatores biológicos e ambientais (Belz; Duke, 2017). Em geral, a hormese protege as plantas contra o estresse e melhora a produtividade da cultura. Também melhora a tolerância das plantas contra condições adversas e fornece a elas uma vantagem competitiva, permitindo que sobrevivam e mantenham sua produção de biomassa (Agathokleous; Calabrese, 2019).

A hormese é definida como uma resposta adaptativa à dose bifásica de um agente tóxico que, quando alta, pode causar inibição e, quando baixa, pode causar estimulação (Calabrese, 2018), conforme reportado anteriormente. A resposta adaptativa é induzida pela perturbação inicial do estado de *homeostase* (Calabrese; Mattson, 2017). A homeostase, por sua vez, é definida como a subsistência constante do estado interno de um organismo com funções e desempenhos eficientes, assegurando um ambiente fisiologicamente estável, mantido diante de uma perturbação (Brito; Haddad, 2017). Essa resposta da planta é reproduzida em uma série de processos fisiológicos, como a eficiência do fotossistema II (FSII), da taxa fotossintética, do conteúdo de clorofila, da atividade da reação de Hill, das vias de sinalização e das enzimas antioxidantes, cujas respostas são eventualmente refletidas em respostas hormonais (Mattson, 2008; Agathokleous; Calabrese, 2019).

relação ao controle sem aplicação de glyphosate. O efeito hormético foi observado apenas em plantas expostas ao glyphosate aos 45 dias após o transplante das mudas (DAT), enquanto a exposição de plantas mais jovens (10 DAT) não apresentou esse estímulo de crescimento (Carvalho *et al.*, 2013).



**Fig. 1.2** (A) Altura de planta e (B) diâmetro do caule do cafeeiro, 60 dias depois da exposição ao glyphosate aplicado nas plantas aos 45 dias após o transplante. As barras verticais indicam o erro padrão da média, e (\*\*) indica a significância a 1% de probabilidade. Fonte: Carvalho *et al.* (2013).

Herbicidas inibidores de processos biossintéticos, como síntese de lipídios, carotenoides e aminoácidos, são opções para uso em baixas doses, pois a sua aplicação pode alterar a concentração de muitos compostos nas plantas (Velini *et al.*, 2008). A aplicação de subdoses de diferentes herbicidas e os seus efeitos em plantas cultivadas são demonstrados na Tab. 1.1. Os valores de estimulação por hormese dos herbicidas variam, em média, entre 20% e 30% acima do controle (Belz; Cedergreen; Duke, 2011).

**Tab. 1.1** Subdoses de diferentes herbicidas e seus efeitos em plantas cultivadas

Nome científico	Nome comum	Herbicida	Concentração (g i.a. ou e.a. ha <sup>-1</sup> )	Efeitos horméticos	Fonte
<i>Oryza sativa</i>	Arroz	Glyphosate	11,6 a 32,0	Estimulou o número de grãos totais e as panículas granadas.	Gitti <i>et al.</i> (2011)
<i>Hordeum vulgare</i>	Cevada	Glyphosate	11,0 a 45,0	Aumentou as taxas fotossintéticas.	Cedergreen e Olesen (2010)
<i>Hordeum vulgare</i>	Cevada	Glyphosate	2,5 a 20,0	Aumentou o rendimento de grãos da cevada em 15%.	Cedergreen <i>et al.</i> (2009)
<i>Hordeum vulgare</i>	Cevada	Glyphosate e metsulfuron-methyl	143,0 e 1,3	Aumentou em 25% o crescimento e o acúmulo de biomassa.	Cedergreen (2008)
<i>Glycine max</i>	Soja	Glyphosate	20,0	Aumentou em 30% a massa seca de broto.	Velini <i>et al.</i> (2008)
<i>Zea mays</i>	Milho	Glyphosate	35,0	Aumentou em 30% a massa seca de broto.	Velini <i>et al.</i> (2008)
<i>Eucalyptus</i> spp.	Eucalipto	Glyphosate	7,2	Aumentou em 70% a massa seca total.	Velini <i>et al.</i> (2008)
<i>Pinus caribea</i>	Pinus	Glyphosate	5,4	Aumentou em 20% a massa seca total.	Velini <i>et al.</i> (2008)
<i>Zea mays</i>	Milho	Glyphosate	0,084 e 7,0	Melhorou a germinação em 16%.	Barbosa <i>et al.</i> (2017)
<i>Zea mays</i>	Milho	Glyphosate	36	Estimulou o crescimento e o desenvolvimento do milho, incluindo atributos de altura de planta e número de folhas.	Latorre <i>et al.</i> (2010)
<i>Saccharum</i> spp.	Cana-de-açúcar	Glyphosate	1,8	Aumentou em 32% o número de perfilhos, em 37% a quantidade de colmos (toneladas por hectare) e em 6,3% o acúmulo de sacarose	Pincelli-Souza <i>et al.</i> (2020)

## 2 Culturas geneticamente modificadas resistentes a herbicidas e controle de plantas daninhas

*Adalín Ceazar Moraes de Aguiar  
Antonio Alberto da Silva  
Kassio Ferreira Mendes*

O controle químico é a principal ferramenta utilizada no manejo de plantas daninhas em grandes áreas. Características como flexibilidade na aplicação, eficiência de controle e redução de mão de obra tornam os herbicidas essenciais na produção de culturas agrícolas. No Brasil, devido à sua elevada importância, o uso de herbicidas chega a próximo de 50% do volume total de pesticidas comercializados no País (Sindiveg, 2020).

Entre os fatores responsáveis pelo aumento no uso de herbicidas em comparação aos demais pesticidas estão o surgimento de biótipos de planta daninhas resistentes a esses compostos e a introdução de cultivares geneticamente modificadas (GM) no mercado. No Brasil, foram plantados cerca de 51,3 milhões de hectares de culturas GM em 2018, principalmente envolvendo a cultura de soja, milho e algodão. Essas grandes culturas biotecnológicas GM tiveram uma adoção média de 93% (ISAAA, 2019).

A adoção dessas tecnologias fez com que aumentasse a utilização de determinados herbicidas em todo o mundo. No caso de inseticidas ou fungicidas, a própria cultura ou cultivar GM exerce o manejo sobre as pragas, como ocorre com tecnologias que utilizam a bactéria *Bacillus thuringiensis* (Bt) e VÍptera (VIP). Por outro lado, a aplicação dos herbicidas é necessária nas plantas GM resistentes, mantendo-se constante a quantidade de produto aplicada, ou até mesmo aumentando o emprego de algumas classes de herbicidas. Em alguns casos, a possibilidade de introdução de mais de um gene em uma mesma cultivar permite a aplicação de herbicidas de diferentes grupos químicos ou, ainda, diferentes mecanismos de ação, o que, por sua vez, viabiliza o uso de vários herbicidas seletivos em um mesmo ciclo da cultura.

Uma das grandes limitações do emprego de herbicidas é a não seletividade de determinadas culturas ou a semelhança botânica entre a cultura e as plantas daninhas. Nesse sentido, as culturas GM com resistência específica a determinados herbicidas propiciaram o uso dessas moléculas em pós-emergência das plantas de interesse, sem causar injúrias à cultura, além de facilitar o controle das plantas daninhas, quando comparadas às cultivares convencionais. Aliado a isso e ao surgimento de biótipos de plantas daninhas resistentes, as culturas GM resistentes a herbicidas elevaram a possibilidade de rotação de herbicidas com diferentes mecanismos de ação, conforme já relatado, permitindo, assim, um manejo mais eficiente das plantas daninhas.

Um dos principais estímulos do desenvolvimento de culturas GM resistentes a herbicidas foi o aperfeiçoamento de algumas técnicas com biotecnologias, de forma a introduzir genes de interesse no genoma das plantas cultivadas. Além disso, as pesquisas envolvendo o desenvolvimento de culturas GM aumentaram, sobretudo pela dificuldade e pelo elevado custo do desenvolvimento de novas moléculas herbicidas.

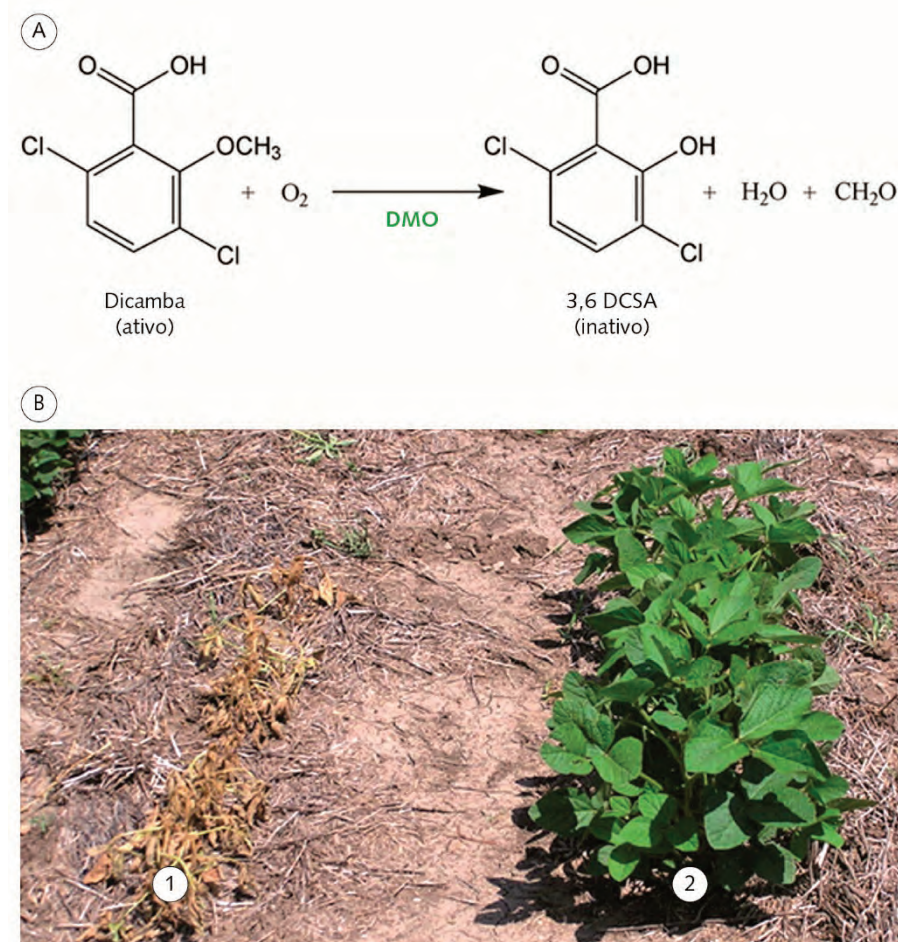
É importante destacar que o termo *resistência a herbicida* é normalmente utilizado para se referir à evolução da resistência a esses produtos ao longo de um período, mas também pode ser usado para remeter às características de resistência introduzidas em uma planta (transgenia) (Rao, 2015). Alguns pesquisadores usam o termo *tolerância*; no entanto, tolerância é considerada uma capacidade inerente de uma espécie de sobreviver e se reproduzir após o tratamento com herbicida, o que implica a não seleção ou manipulação genética para tornar a planta tolerante, ou seja, ela é tolerante naturalmente. A partir disso, será utilizado neste capítulo o termo *resistência* para se referir a culturas que foram modificadas geneticamente com o intuito de suportar aplicações de herbicidas.

Neste capítulo, são abordadas as principais culturas GM resistentes a herbicidas no Brasil, destacando os benefícios e as implicações da adoção dessas tecnologias, e reportando as opções de controle de plantas daninhas aliadas a elas.

### 2.3.7 Resistência ao dicamba

Para conferir resistência ao dicamba, foi introduzido no genoma das plantas de soja, algodão e milho o gene *dmo* (demetilase), oriundo da bactéria de solo *Pseudomonas maltophilia* (cepa DI-6), o qual expressa a proteína dicamba monoxigenase (DMO), responsável pela característica de resistência ao dicamba.

A proteína DMO catalisa a adição de uma molécula de oxigênio molecular ( $O_2$ ) ao grupo metil do dicamba, o que leva à conversão desse composto em um produto não herbicida chamado de ácido 3,6-diclorossilicólico (DCSA), formaldeído ( $CH_2O$ ) e água ( $H_2O$ ). A DMO atua na destruição da atividade herbicida do dicamba antes que o produto possa atingir níveis tóxicos nas plantas GM tratadas (Fig. 2.9).



**Fig. 2.9** (A) Conversão de dicamba em DCSA pela enzima DMO, promovendo inativação da molécula de herbicida, e (B) efeitos de tratamentos com dicamba em plantas de soja não transgênicas (1) e transgênicas (2) contendo o gene DMO geneticamente modificado em condições de campo. Dose de  $2,8 \text{ kg ha}^{-1}$  de dicamba aos oito dias após a aplicação  
Fonte: Behrens *et al.* (2007).

No cultivo da soja e algodão sem essa tecnologia, aplicações de dicamba na dessecação e logo após a semeadura da cultura são prejudiciais, devido ao residual deixado no solo por esse herbicida, que pode afetar a germinação e o crescimento inicial da soja e do algodão. Nesse caso, a semeadura da soja sensível pode ser inviabilizada por um período de 30 a 60 dias, chegando a 120 dias, a depender das características do solo e condições ambientais. Assim, ter a soja e o algodão resistentes ao dicamba, além de aumentar o espectro de controle em pós-emergência, permite aplicações do dicamba na dessecação, sem prejudicar o crescimento e desenvolvimento das plantas. Isso gera a possibilidade de uma flexibilização no manejo de plantas daninhas das culturas em pré- e pós-emergência.

Mesmo sendo um herbicida recomendado apenas para controle de plantas daninhas eudicotiledôneas, o dicamba tem a capacidade de causar danos em plantas de milho não transgênico, tanto aplicado em pré- como em pós-emergência (Cao *et al.*, 2011). Os danos ocorrem com maior intensidade no sistema radicular, promovendo o

### 3 Adjuvantes, formulações e misturas de herbicidas em tanque de pulverização

*Francisco Cláudio Lopes de Freitas*

*Leticia Damo*

*Kassio Ferreira Mendes*

*Antonio Alberto da Silva*

*Kamila Cabral Mielke*

O Brasil é um dos maiores produtores de alimentos do mundo. No entanto, os climas tropical e subtropical favorecem a incidência de problemas fitossanitários relacionados à ocorrência de doenças e pragas e à interferência de plantas daninhas. Em consequência, há um aumento do uso de defensivos agrícolas como alternativa para evitar ou diminuir perdas quantitativas e qualitativas causadas por esses organismos (Gazziero, 2015; Oliveira, 2019). É comum a ocorrência simultânea de diversas espécies de plantas daninhas e/ou pragas e patógenos na mesma área de cultivo. Nesse cenário, com o intuito de aumentar o espectro de controle ou atingir mais de um organismo-alvo, é frequente o uso de dois ou mais defensivos, misturados no tanque do pulverizador (Petter *et al.*, 2012; Gazziero, 2015; Decaro Jr., 2019), otimizando os equipamentos de aplicação e reduzindo custos.

Muito realizada informalmente pelos produtores, a prescrição de mistura de defensivos agrícolas em tanque só foi regulamentada no Brasil em 2018, pela Instrução Normativa nº 40 (Brasil, 2018). A nova regulamentação intensifica a necessidade de estudos e informações sobre as diferentes interações que podem ocorrer em decorrência da mistura em tanque, que vão desde a incompatibilidade física até a perda de eficácia dos ingredientes ativos.

Em se tratando de herbicidas, são muitas as possibilidades de interações com outros herbicidas ou mesmo com outros produtos aplicados em mistura no tanque do pulverizador, como inseticidas, fungicidas, fertilizantes foliares e até mesmo adjuvantes. Essas interações podem gerar tanto resultados positivos quanto negativos sobre a eficácia no controle das plantas daninhas, bem como sobre a seletividade às culturas, além de variações na compatibilidade física e química, que resultam em reações como aumento na taxa de volatilização ou decantação no fundo do tanque.

Nas misturas, podem ocorrer variações de compatibilidade até para produtos comerciais pertencentes a um mesmo ingrediente ativo (i.a.) que, em alguns casos, está disponível no mercado em diferentes formulações, como é o caso do glyphosate, comercializado no Brasil em diferentes sais (isopropilamina, potássio, amônio, diamônio e dimetilamina). Verifica-se compatibilidade diferenciada entre esses sais e outros defensivos agrícolas, a exemplo do dicamba, que não deve ser aplicado em mistura com glyphosate na formulação sal de amônio, devendo-se dar preferência ao sal de potássio.

Além da diferença na compatibilidade com outros defensivos agrícolas, as distintas formulações de herbicidas disponíveis no mercado possuem grande variabilidade em relação a diversos fatores, como concentração do ingrediente ativo/equivalente ácido, segurança e facilidade no preparo de calda e aplicação e facilidade quanto ao transporte, armazenamento e descarte de embalagens.

Outro aspecto relevante relacionado à eficácia dos herbicidas é o uso de adjuvantes, que podem vir no produto formulado ou serem adicionados à calda no tanque do pulverizador. Os adjuvantes possuem diversas funções: modificar propriedades da solução, visando viabilizar a eficácia do herbicida; atuar na melhoria na qualidade da água usada na aplicação, na compatibilidade de misturas, e na interação entre o i.a. e o alvo; e facilitar a aplicação e a segurança no processo de aplicação. Entretanto, a adição de adjuvantes à calda deve ser realizada com critérios específicos em cada caso, no sentido de evitar tanto a perda na eficácia quanto a injúria nas culturas.

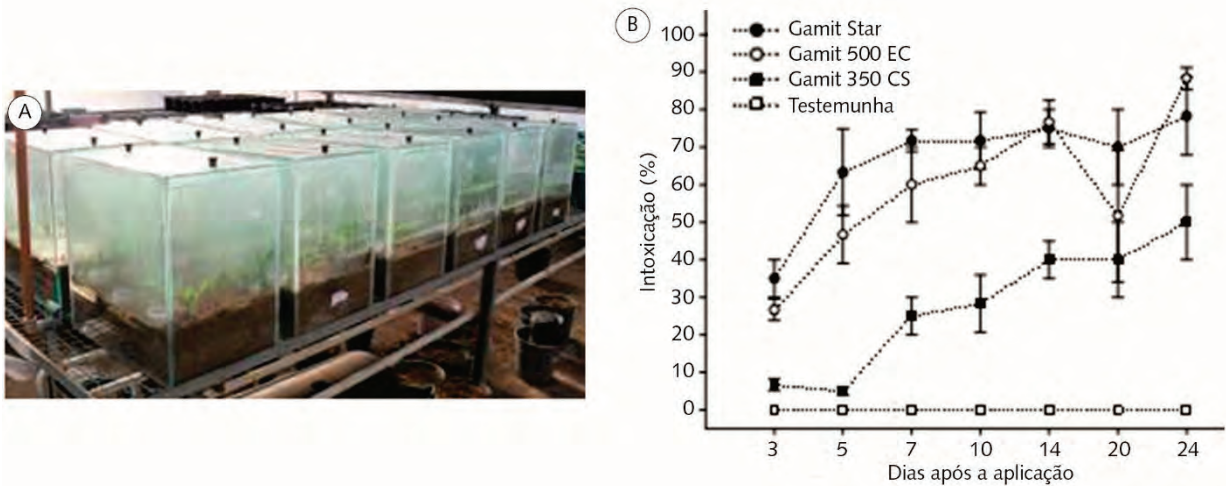
Neste capítulo, são apresentadas informações mais confiáveis para estudantes, técnicos e produtores em relação aos adjuvantes e às formulações de herbicidas, bem como às misturas de herbicidas no tanque do pulverizador.

#### 3.1 Adjuvantes

Os adjuvantes são substâncias adicionadas à formulação ou à calda de aplicação para modificar ou auxiliar a ação de um produto fitossanitário ou de uma mistura em tanque, visando garantir a eficácia e a segurança no processo de



herbicida na formulação Gamit 360 CS<sup>®</sup> (microencapsulado), em comparação às formulações não encapsuladas (Gamit 500 EC<sup>®</sup> e Gamit Star<sup>®</sup>) (Fig. 3.5B).



**Fig. 3.5** (A) Redução de injúrias em plantas de sorgo em caixas de vidro hermeticamente fechadas, (B) com presença do clomazone na formulação Gamit 360 CS<sup>®</sup> (microencapsulado) em comparação às formulações não encapsuladas (Gamit 500 EC<sup>®</sup> e Gamit Star<sup>®</sup>)  
Fonte: adaptado de Schreiber *et al.* (2015).

A nanoencapsulação do atrazine (nanoatrazina) aplicado em pós-emergência resultou em maiores e mais rápidas taxas de absorção do herbicida em folhas de mostarda (*Brassica juncea*), com incremento de 40% no herbicida absorvido 24h após a aplicação, induzindo maior inibição da atividade do fotossistema II, segundo Takeshita *et al.* (2021). Esses mesmos autores verificaram que a nanoencapsulação potencializou a atividade do atrazine em condições de campo, com taxas de controle de nabíça (*Raphanus raphanistrum*) duas vezes maior em relação às do atrazine na formulação comercial.

### 3.3 Misturas de herbicidas

O controle de plantas daninhas visa, entre outros aspectos, evitar ou reduzir a competição delas com a cultura. É importante lembrar que existem centenas de espécies de plantas daninhas, e elas possuem as mais variadas características morfológicas e fisiológicas, que lhes conferem comportamento diferenciado (susceptibilidade, tolerância ou resistência) em relação aos herbicidas utilizados. Além desse fato, a necessidade de reduzir os custos de produção da cultura tem levado os produtores, bem como os fabricantes, a preparar misturas de herbicidas com diferentes princípios ativos e, também, mistura de herbicidas com outros defensivos e/ou insumos agrícolas, como inseticidas, fungicidas e fertilizantes foliares.

Houve grande expansão no uso de misturas e na aplicação sequencial de vários herbicidas em um único ciclo cultural; no entanto, o manejo de herbicidas, especialmente as misturas, requer grande cuidado, além do conhecimento das interações entre os produtos, com o objetivo de obter a eficácia desejada no controle de plantas daninhas e minimizar injúrias às culturas. Sempre que possível, deve-se dar preferência às misturas prontas; todavia, é limitada a disponibilidade de herbicidas comercializados dessa forma, o que leva à necessidade de realização de misturas em tanque na propriedade.

#### 3.3.1 Regulamentação de misturas em tanque

A mistura de defensivos em tanque, como é conhecida, é uma prática muito utilizada no Brasil e em outros países. Pode ser definida como a combinação de dois ou mais defensivos agrícolas e/ou fertilizante foliar no tanque do pulverizador, imediatamente antes da pulverização (Gazziero, 2015; Vechia, 2017).

Um estudo realizado por Gazziero (2015) em diferentes regiões do Brasil levantou que 97% dos entrevistados frequentemente ou quase sempre praticam misturas em tanque. Além disso, a maior parte (72%) desconhece ou não possui informações técnicas suficientes sobre a utilização de misturas em tanque, o que reforça a importância da

## 4 Mapeamento de plantas daninhas e aplicação de herbicidas no manejo de precisão baseado no sensoriamento remoto

*Alessandro da Costa Lima  
Kassio Ferreira Mendes  
Marcelo Chan Fu Wei*

A grande demanda por alimento e a limitação da expansão territorial nas novas áreas agrícolas direcionam a agricultura para uma intensificação crescente, com uso racional de recursos e maximização da produção (Foley *et al.*, 2011). A população mundial em 2050 está estimada em nove bilhões de pessoas. Com esse número, há necessidade de um aumento na produção de alimentos em torno de 70% a 100%, que pode ser alcançado com a adoção de técnicas de cultivo mais eficientes e que causem menos impactos negativos ao meio ambiente (Godfray *et al.*, 2010). Para que isso seja possível, é preciso ter conhecimento e controle das variáveis que interferem nos custos de produção e na produtividade das lavouras. Nesse sentido, a agricultura de precisão (AP) é uma ferramenta que permite atender a essas necessidades.

A agricultura de precisão é uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais e os combina com outras informações no apoio de decisões de gestão, de acordo com a variabilidade estimada, para melhorar a eficiência do uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agrícola (Ispa, *s.d.*). Essa estratégia agrícola parte do princípio de que uma área de produção não é homogênea, ou seja, tem grande variação; portanto, não é apropriado usar insumos agrícolas e técnicas de manejo iguais em áreas com características diferentes (Lima; Mendes, 2021). O conhecimento agregado ao longo da história ajuda a explicar cientificamente as variabilidades observadas e oferece caminhos para realizar o manejo localizado com técnica e rigor (Molin; Amaral; Colaço, 2015).

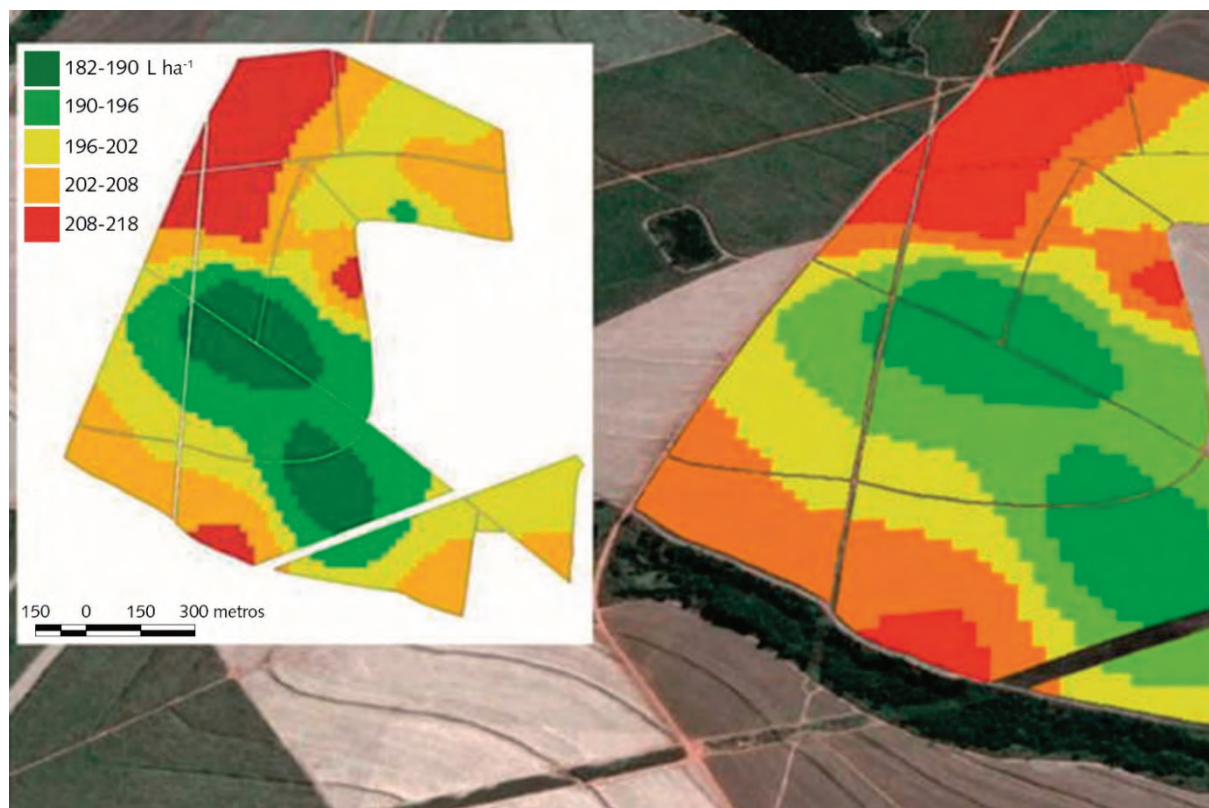
A agricultura de precisão se beneficia do surgimento e da convergência de várias tecnologias, incluindo sistemas globais de navegação por satélite (do inglês *global navigation satellite system*, GNSS) como GPS (do inglês *global system position* – Estados Unidos), Beidou (China), Glonass (Rússia) e Galileo (União Europeia), sistema de informação geográfica (SIG, do inglês *geographic information system*, GIS), microcomputadores, controle de automação, sensoriamento remoto, computação móvel, processamento avançado de informação e telecomunicações (Gibbons, 2000). Com essas tecnologias, é possível analisar a variabilidade espacial por meio de coleta de dados, gerenciamento de informação, aplicação de insumos em taxas variadas e avaliação dos resultados econômicos e ambientais (Soares Filho; Cunha, 2015).

O uso de técnicas de agricultura de precisão permite a visualização de atributos de interesse de forma espacializada de uma lavoura, auxiliando na tomada de decisão sobre o manejo do empreendimento (Gebbers; Adamchuk, 2010) na qual destaca-se no uso em aplicações de fertilizantes e controle de plantas daninhas.

Assim, neste capítulo serão abordados os aspectos referentes ao mapeamento de plantas daninhas e à aplicação de herbicidas no manejo de precisão baseado no sensoriamento remoto, bem como os benefícios da utilização da agricultura de precisão no manejo de plantas daninhas e os métodos utilizados, como mapas e sensores. Serão também apresentados métodos de interpolação de dados, aplicação de herbicidas em taxa variada na pré- e pós-emergência, uso de controladores de taxa variada nos equipamentos de pulverização e utilização de inteligência artificial na identificação de plantas daninhas.

### 4.1 Aplicação de herbicidas em taxa variada (ATV)

O controle de plantas daninhas com herbicidas compõe boa parte dos custos de produção de uma cultura. Na agricultura convencional, as doses de um herbicida são recomendadas para grandes áreas, sem considerar muitos aspectos da variação espacial e temporal. Quando o uso de herbicidas é feito em taxa fixa, ocorrem perdas econômicas diretas e indiretas, tanto pelo gasto acima do necessário com esses compostos, quanto por possíveis falhas de controle decorrentes de aplicações de subdoses que diminuem a produtividade, assim como riscos de intoxicação da cultura de interesse. Além disso, pode ocorrer contaminação ambiental por meio da lixiviação do herbicida aos corpos de águas



**Fig. 4.4** Mapa de aplicação de herbicidas em taxa variada (ATV) elaborado com o sistema HTV®  
Fonte: APagri (2020).

Devido às limitações tecnológicas, ainda não há ATV disponível no mercado para herbicidas em pré-emergência baseada em sensores que captam, processam os dados e aplicam o herbicida sem a necessidade de geração de mapas. Um dos grandes desafios desse mercado é justamente eliminar essa etapa, tendo em vista seu elevado custo.

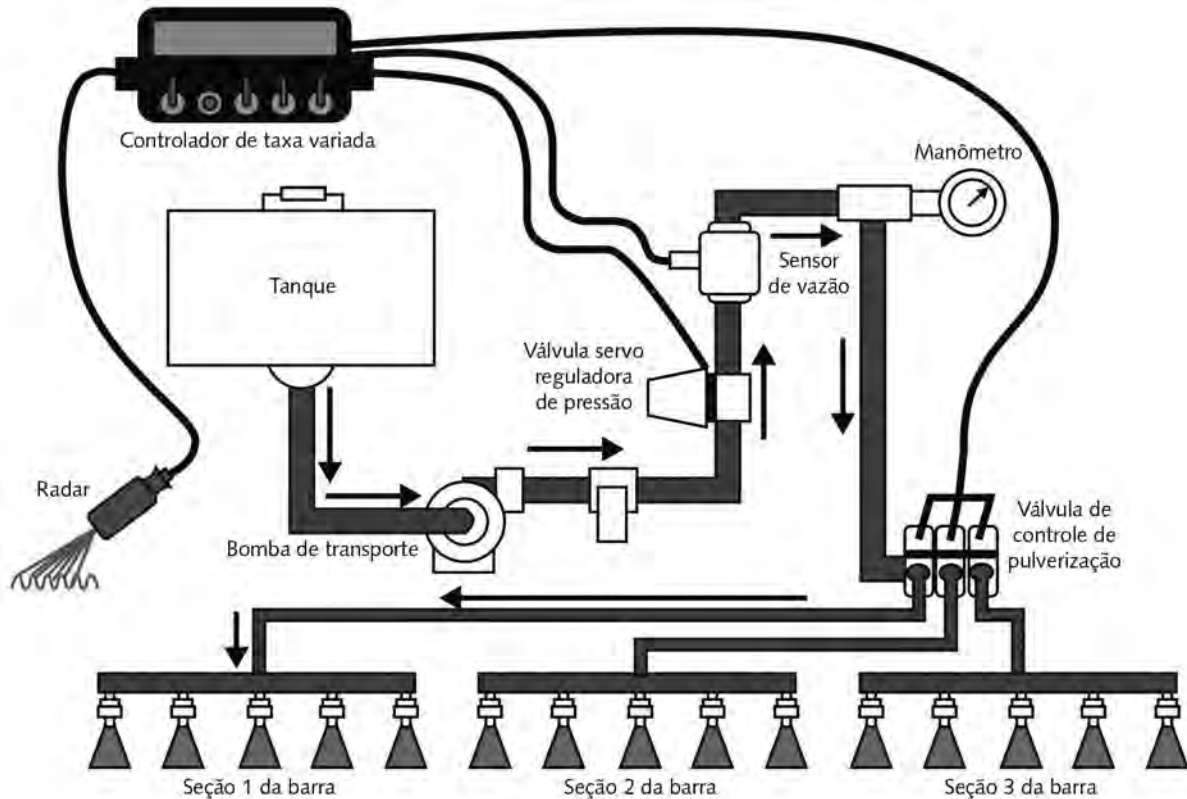
### 4.3 Aplicação em taxa variada (ATV) na pós-emergência

O objetivo de uma aplicação de herbicida em pós-emergência é controlar plantas daninhas que já emergiram no campo. Assim, o alvo da aplicação é a parte aérea das espécies vegetais. Para que a ATV possa ser utilizada em pós-emergência, é necessário que o sistema tenha informações sobre a comunidade de plantas daninhas da área, que podem ser coletadas pelos métodos baseados em mapas ou sensores. Portanto, ambos os métodos podem ser usados na ATV em pós-emergência.

#### 4.3.1 Método de mapas: mapeamento de plantas daninhas

A literatura cita diversas metodologias de mapeamento de plantas daninhas, cada uma com sua especificidade. A maioria utiliza algoritmos de *machine learning* e redes neurais profundas para identificar plantas daninhas e separá-las da cultura e do solo (Schuster; Nordmeyer; Rath, 2007; Tamouridou *et al.*, 2017; Sa *et al.*, 2018), e todas têm o princípio baseado na identificação quantitativa e qualitativa da área infestada, geração do mapa de recomendação e integração com o sistema de ATV.

O sensoriamento remoto é considerado uma das tecnologias mais importantes na agricultura de precisão, e pode ser usado no mapeamento de plantas daninhas. O sensoriamento remoto pode monitorar muitas culturas e parâmetros da vegetação por meio de imagens em diferentes comprimentos de onda. Há três níveis de obtenção de dados: orbital (satélites); aéreo (RPA, do inglês *remotely piloted aircraft*, ou aeronaves remotamente pilotadas, não tripuladas); e proximal (condutividade elétrica e espectroscopia). As imagens de satélite muitas vezes não são a melhor opção devido à baixa resolução espacial das imagens adquiridas e às restrições das resoluções temporais, visto que nem sempre os satélites estão disponíveis no momento ideal para capturar as imagens necessárias (Tsouros; Bibi; Sarigiannidis, 2019).



**Fig. 4.20** Sistema de pulverização ATV de sistema de taxa de aplicação baseado em fluxo  
Fonte: adaptado de Grisso *et al.* (2011).

Dependendo da velocidade, podem ocorrer problemas de deriva, visto que o sensor de fluxo e a válvula-servo controlam o fluxo da mistura do tanque, permitindo que taxas de pressão variáveis sejam distribuídas aos bicos de pulverização. Assim, altas velocidades podem representar um aumento na pressão nos bicos e uma consequente diminuição no espectro de gotas.

#### 4.4.2 Sistema de injeção química direta

Nesse sistema, a mistura é preparada com injeção direta do produto químico em uma vazão de água constante. Esse sistema, mostrado na Fig. 4.21, usa um controlador e uma bomba para gerenciar a taxa de injeção de produto químico, em vez da taxa de fluxo de uma mistura do tanque (Rashidi; Mohammadzamani, 2011). A taxa de fluxo de água é constante e a taxa de injeção de herbicida é variada, para acomodar mudanças na velocidade do solo ou na taxa prescrita.

Com a injeção química direta, não há sobra de mistura, e o contato direto do operador com produtos tóxicos é reduzido (Ahmad; Mahdi, 2018). O sistema permite controlar o tamanho e o espectro de gotas desejados, uma vez que a variação da taxa de aplicação independe da vazão e da pressão nos bicos de pulverização. Sua principal desvantagem é o longo atraso no transporte entre a bomba de injeção de produto químico e os bicos nas extremidades da barra.

## 5 Remediação de solos contaminados por herbicidas

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

O uso de pesticidas tem beneficiado a sociedade moderna, melhorando a quantidade e a qualidade da produção mundial, se tornando parte integrante dos sistemas agrícolas de produção. Apesar disso, o uso extensivo e impróprio desses produtos químicos já causou considerável poluição ambiental, e sua exposição contínua leva maior risco à saúde de organismos não alvo, como plantas, animais e a população humana, uma vez que essas substâncias podem se bioacumular e biomagnificar em organismos vivos em diferentes níveis tróficos (Pelcastre *et al.*, 2013). Sob algumas condições, os herbicidas podem ser transportados por lixiviação ou escoamento superficial para as águas subterrâneas ou fontes de água superficiais, respectivamente. Além do risco de poluição aos ecossistemas e à saúde humana, o efeito residual prolongado dos herbicidas pode causar injúrias às lavouras em rotação ou sucessão (Janaki *et al.*, 2015).

A toxicidade ou contaminação por herbicidas pode ser reduzida pelo processo de biorremediação, que explora a capacidade natural de plantas e microrganismos na descontaminação por meio da degradação ou imobilização dos herbicidas (Rayu; Karpouzias; Singh, 2012). A aplicação eficiente dessa tecnologia depende principalmente da variedade e toxicidade dos herbicidas e das características físico-químicas do solo (Glick, 2003). Em certas situações, pode-se optar por utilizar a biorremediação microbiana, que depende exclusivamente dos microrganismos do solo, como bactérias e fungos, ou a fitorremediação, que depende das plantas para a remediação de solos contaminados. As relações simbióticas entre as plantas e seus microrganismos associados pode ocasionar uma maior eficiência do processo de fitorremediação. O uso de minhocas remediadoras de solos contaminados, por exemplo, é denominado vermirremediação. Uma das razões mais importantes para se usar a biorremediação na eliminação de herbicidas é que possui menor custo e é ambientalmente eficaz, oferecendo a possibilidade de eliminar ou processar contaminantes orgânicos a partir da atividade biológica natural (Morillo; Villaverde, 2017).

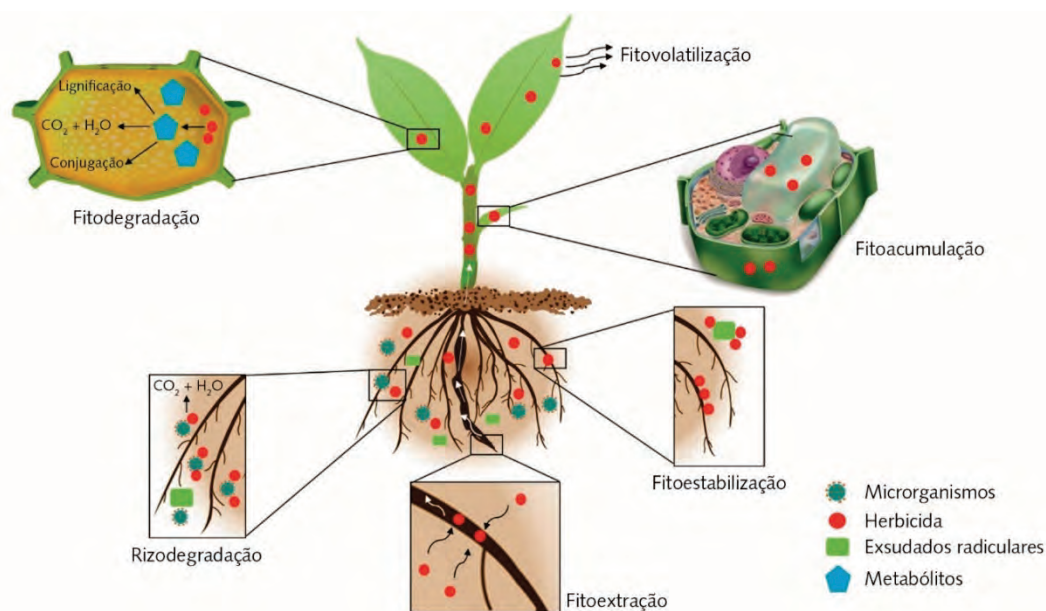
Outra opção seria a utilização de biocarvões e resíduos orgânicos. As características distintas de alta capacidade de sorção, área superficial específica, microporosidade e troca iônica (Ahmad *et al.*, 2014) também tornam os biocarvões potenciais remediadores de diferentes herbicidas dos solos e águas, por meio da técnica de imobilização. Uma das metas mais importantes da aplicação de biocarvões é reduzir a biodisponibilidade de xenobióticos e, conseqüentemente, diminuir o acúmulo e a toxicidade aos organismos. Materiais carbonáceos, assim como resíduos orgânicos, são geralmente usados como tecnologia de imobilização, reduzindo a biodisponibilidade do herbicida e sua mobilidade nos recursos hídricos e organismos vivos, e também melhoram a disponibilidade de nutrientes que estimulam o crescimento das plantas e promovem a restauração ecológica (Khorram *et al.*, 2016).

Neste capítulo, são detalhadas essas diferentes técnicas biotecnológicas de remediação de solos contaminados por herbicidas.

### 5.1 Biorremediação microbiana dos herbicidas

A biodegradação é, para a maioria dos herbicidas, a principal via de dissipação no meio ambiente (Bundt *et al.*, 2015), e as técnicas de biorremediação podem diminuir o impacto dos herbicidas na contaminação ambiental. Na biorremediação natural do solo, os microrganismos nativos existentes são usados para degradar os contaminantes-alvo (Morillo; Villaverde, 2017). No entanto, em situações em que o número de microrganismos que favorecem a degradação é insuficiente e/ou em que as populações nativas não possuem as vias catabólicas necessárias para a metabolização, é necessária a inoculação de consórcios enriquecidos ou cepas degradantes com capacidade catalítica desejada, sendo esse processo denominado bioaugmentação (Gentry; Rensing; Pepper, 2004; Mrozik; Piotrowska-Seget, 2010). Por outro lado, a bioestimulação consiste na introdução de nutrientes adicionais na forma de fertilizantes orgânicos e/ou inorgânicos em um sistema contaminado, que promovem o crescimento e estimulam a população de microrganismos nativos (Vasconcelos *et al.*, 2009). Portanto, para uma biorremediação efetiva, é preciso realizar a caracterização físico-química

comunidades microbianas da rizosfera aerando o solo e liberando exoenzimas, bem como nutrientes através dos exsudatos das raízes, ao mesmo tempo em que fornecem superfície para colonização e nichos para proteger as bactérias contra a dessecação e outros estresses abióticos e bióticos (Kuiper *et al.*, 2004). Esses diferentes processos realizados pelas plantas e microrganismos associados estão exemplificados na Fig. 5.1.



**Fig. 5.1** Mecanismos de fitorremediação desenvolvidos pelas plantas para solo contaminado com herbicidas

Fonte: adaptado de Ye *et al.* (2017).

A utilização da fitorremediação para descontaminação de ambientes com resíduo de herbicidas é baseada na seletividade, natural ou desenvolvida, que algumas espécies vegetais exibem a determinados compostos ou mecanismos de ação (Quadro 5.2), o que pode ser de ocorrência comum em espécies agrícolas melhoradas geneticamente e por várias espécies de plantas daninhas, tolerantes ou resistentes a certos herbicidas ou grupos de herbicidas. Essa seletividade deve-se ao fato de que os herbicidas podem ser absorvidos pelas folhas, caules ou raízes e translocados para diferentes tecidos da planta, podendo ainda sofrer o processo de volatilização. Os herbicidas também podem sofrer parcial ou completa degradação pela planta, ou ser transformados em compostos menos tóxicos, especialmente menos fitotóxicos, combinados e/ou ligados a tecidos das plantas. Entretanto, na maioria dos casos de sucesso da fitorremediação, tem-se atribuído a diminuição do herbicida no solo à ação do fitorremediador de promover o estímulo à microbiota associada à planta (Procópio *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2007). Contudo, para obter resultados satisfatórios com a utilização de plantas na descontaminação de solos com herbicidas, é essencial conhecer o tempo total necessário para esse processo, que às vezes é muito longo, e os procedimentos do emprego correto da técnica.

**Quadro 5.2** Exemplos de espécies vegetais utilizadas na fitorremediação de herbicidas

Mecanismo fitorremediador	Espécies	Herbicida	Comentários	Fonte
n.d. <sup>a</sup>	<i>Mucuna aterrima</i> e <i>Canavalia ensiformis</i>	Trifloxysulfuron-sodium	Maior desenvolvimento e produtividade do <i>Phaseolus vulgaris</i> em solos fitorremediados	Procópio <i>et al.</i> (2005)
n.d.	<i>Eleusine coracana</i>	Picloram	A espécie na densidade de 172 m <sup>2</sup> mostrou ter capacidade de remediar solos contaminados com o herbicida	Procópio <i>et al.</i> (2008)
Fitodegradação	<i>Eremanthus crotonoides</i> e <i>Inga striata</i>	Clomazone e atrazine	Redução da concentração dos herbicidas no solo em 90% após cultivo das plantas	Aguiar <i>et al.</i> (2020a)
n.d.	<i>Canavalia ensiformis</i> e <i>Crotalaria juncea</i>	Sulfentrazone	O cultivo prévio das espécies fitorremediadoras promoveu a remediação do sulfentrazone.	Belo <i>et al.</i> (2016)