

Herbicidas

Núbia Maria Correia¹

Resumo - Herbicidas são produtos químicos que, se usados em concentrações adequadas, controlam as plantas daninhas, sem ocasionar prejuízos à cultura. No entanto, a sua adoção deve ser racional e equilibrada, para que não ocorra seleção de plantas daninhas resistentes ou poluição ambiental (contaminação do solo, da água ou do ar). Por isso, é necessário conhecer aspectos técnicos relacionados com os herbicidas, como as principais classificações, interação herbicida-planta, quanto à absorção, translocação, seletividade e mecanismo de ação; resistência de plantas daninhas e comportamento no ambiente. A aplicação de herbicidas na agricultura moderna é algo imprescindível, em decorrência da facilidade, baixo custo e menor dependência de mão de obra, comparado aos demais métodos de controle, como a capina. Porém, esses produtos devem ser complementares a outras estratégias de manejo e não únicos e exclusivos nos sistemas de produção. Como exemplo da integração de métodos, tem-se o manejo adotado em alguns pomares citrícolas, onde é feito o cultivo de espécies forrageiras nas entrelinhas dos citros e o tamanho das plantas manejado com roçadeira, associado à aplicação localizada e protegida de herbicidas apenas na linha da cultura.

Palavras-chave: Controle químico. Planta daninha. Matologia. Resistência. Seletividade.

Herbicidas

Abstract - Herbicides are chemicals that are used in appropriate concentrations to control weeds without causing damage to the crop. However, its adoption must be rational and balanced, so that there is no selection of resistant weeds or environmental pollution (contamination of soil, water or air). Therefore, in this work, technical aspects related to herbicides were presented, such as the main classifications, herbicide - plant interaction, regarding absorption, translocation, selectivity and mechanism of action; weed resistance and behavior in the environment. The objective was to show useful and basic information, but of great applicability in the field, by understanding the dynamics of products in the plant and in the environment, using simple and easy to understand language. The application of herbicides in modern agriculture is essential, due to the ease, lower cost and employee dependency, compared to other control methods, such as hoeing. However, these products must be complementary to other management strategies and not unique and exclusive in production systems. As an example of the integration of methods, there is the management adopted in some citrus groves, where the cultivation of forage species is carried out between the lines of the citrus, and the size of the plants managed with a brushcutter, associated with the localized and protected application of herbicides only in culture line.

Keywords: Chemical control. Plant out of place. Resistance. Selectivity. Weeds.

INTRODUÇÃO

Herbicida é um produto químico que em concentrações convenientes tem a finalidade de inibir o desenvolvimento ou provocar a morte das plantas daninhas. Esses produtos exigem cuidados especiais na manipulação e aplicação. Para muitos trata-se de mais um defensivo agrícola, agrotóxico ou veneno a ser colocado no tanque do pulverizador e aplicar. Porém, não é tão simples assim. Os herbicidas

em dosagens adequadas controlam um grupo de espécies, preservando a cultura de interesse. No entanto, se não forem respeitados os limites de doses ou as épocas de aplicação recomendadas, esses herbicidas poderão matar ou causar danos irreversíveis de produtividade à cultura. A etiologia da palavra é clara: *herbi* = planta, *cida* = mata, mata planta.

Planta daninha é um termo agrônomo e leva em consideração os danos (diretos e

indiretos) causados às culturas agrícolas ou alguma outra atividade econômica. Trata-se de uma planta que naquele determinado momento está indo contra os interesses do homem, de forma direta ou indireta. As plantas daninhas interferem nas culturas agrícolas, tanto pela competição por água, nutrientes, luz e espaço como pela eliminação de substâncias químicas, os aleloquímicos, que podem comprometer o desenvolvimento das plantas. Além dos

¹ Eng. Agrônoma, D.Sc., Pesq. EMBRAPA Cerrados, Brasília, DF, nubia.correia@embrapa.br.

danos diretos causados às culturas, como perdas na produção e qualidade do produto colhido, as plantas daninhas servem como hospedeiras alternativas de pragas, doenças e nematoides.

Qualquer espécie pode ser daninha, dependendo do momento e do local de ocorrência. Assim, plantas de milho (do cultivo anterior) infestando a cultura da soja são consideradas daninhas, conhecidas popularmente como planta voluntária, tiguera, resteva, etc. Mas, é claro, têm-se as plantas daninhas verdadeiras, que não foram melhoradas geneticamente e sobrevivem em condições adversas, como tiririca (*Cyperus rotundus*), picão-preto (*Bidens pilosa*), maria-pretinha (*Solanum americanum*), etc.

O conhecimento da morfologia, fisiologia e ecologia da planta daninha é importante para a escolha da melhor estratégia de controle. Por exemplo, o controle de plantas com estruturas de reprodução vegetativa, como rizomas, estolões ou tubérculos, inviabiliza o uso de herbicidas pouco móveis ou imóveis na planta (de contato), pois não há o transporte do herbicida até essas estruturas. Além disso, o corte da parte aérea de algumas espécies eudicotiledôneas, como guanxuma (*Sida* spp.) e buva (*Conyza* spp.), deve ser feito rente à base da planta, para desfavorecer a rebrota, porque a ramificação lateral é mais difícil de ser controlada pelos herbicidas.

CLASSIFICAÇÃO DOS HERBICIDAS

Época de aplicação

Os herbicidas podem ser aplicados antes ou após a emergência das plantas daninhas no campo. Nas aplicações em pós-emergência, a planta daninha já emergiu na superfície do solo, então, o alvo da pulverização é a planta. Quando a emergência ainda não ocorreu, o alvo é o solo e a aplicação é feita em pré-emergência, ou seja, antes da emergência da planta no solo. Nesse caso, quando a semente da planta daninha iniciar o processo de germinação (no solo), a radícula e o caulículo serão emiti-

dos, e absorverão o herbicida que atingiu o solo. Ressalta-se que os herbicidas não possuem ação em sementes dormentes e quiescentes, apenas naquelas que iniciarão o processo de germinação.

As sementes dormentes, de forma geral, são sementes viáveis (vivas) no solo, que não iniciam o processo germinativo por algum fator interno, inerente à própria semente. Já as sementes quiescentes são aquelas que estão viáveis no solo, mas não iniciam a germinação em função de algum fator externo (do ambiente) inadequado, como falta de água, temperatura e concentrações de dióxido de carbono (CO₂)/oxigênio (O₂) do solo não ideais, etc.

A escolha da dosagem do herbicida aplicado em pós-emergência é feita em função das espécies presentes no local e do estágio de desenvolvimento das plantas, o que justifica os intervalos de dosagens apresentados nas bulas dos produtos. Para os herbicidas residuais, aplicados em pré-emergência, o critério, além do histórico de infestação, refere-se à textura e ao teor de matéria orgânica (MO) do solo. Geralmente, dependendo do caráter químico da molécula, solos de textura argilosa (maior superfície de retenção) e/ou com alto teor de MO necessitam de maior dosagem do herbicida.

O tipo de argila é mais importante do que a sua quantidade no solo, porém, as informações de dosagem são dadas em função apenas da textura e do teor de MO, não levando em consideração o material de origem do solo. O uso correto das dosagens dos herbicidas utilizados em pré ou pós-emergência é de grande importância para o sucesso do controle das plantas daninhas.

Os herbicidas devem ser aplicados quando as condições edafoclimáticas forem adequadas, como alta umidade relativa (UR) do ar (no mínimo 55%), temperatura do ar menor que 30 °C, velocidade do vento de 3 a 10 km/h, com possibilidade de aumentar o intervalo dependendo da ponta de pulverização utilizada e, principalmente, umidade do solo. Quando aplicados em pós-emergência, a umidade favorece a absorção e a translocação do herbicida e,

consequentemente, a sua ação na planta. Para os herbicidas com ação de solo (residual), a umidade é importante, pois favorece a sua distribuição na solução do solo e/ou retenção aos colóides minerais e orgânicos, além de favorecer sua absorção pelas raízes e translocação pelo xilema da planta.

Espectro de controle

Quanto ao espectro de controle, os herbicidas podem ser classificados como de amplo espectro, graminicidas ou latifoliadicidas. O primeiro refere-se aos produtos que controlam grande diversidade de espécies, incluindo monocotiledôneas e eudicotiledôneas (ex.: glyphosate, amônio-glufosinato, etc.). Já os graminicidas controlam espécies da família Poaceae, as gramíneas, com exclusividade (ex.: clethodim, fluazifop-p-butyl, haloxyfop-methyl, etc.) ou não (ex.: s-metolachlor, trifluralin, etc.). Nesse caso, predomina o controle de gramíneas, mas também ocorre o controle de algumas dicotiledôneas e até outras monocotiledôneas, como traçoeraba (*Commelina benghalensis*), para o s-metolachlor. Para os latifoliadicidas ou latifolicidas, como são conhecidos no campo, predomina o controle das plantas daninhas de “folhas largas”, que inclui espécies da classe eudicotiledônea, podendo ainda controlar algumas monocotiledôneas (ex.: atrazine, mesotrione, etc.).

Seletivos e não seletivos

Os herbicidas podem ser classificados em seletivos e não seletivos. Os herbicidas seletivos (ex.: atrazine para milho, metribuzin para tomate, etc.) podem ser pulverizados nas culturas indicadas sem causar danos à produção, desde que respeitado o limite de dosagens indicado na bula e a época de aplicação. Já os herbicidas não seletivos (ex.: glyphosate e diquat) não podem ser aplicados diretamente em nenhuma cultura após a sua emergência no campo, pois ocasionarão a mortalidade das plantas, com exceção dos cultivos transgênicos tolerantes ao glyphosate.

Translocação

Após a absorção, os herbicidas podem translocar a longas distâncias na planta, com movimentação pelo xilema (translocação apoplástica), floema (translocação simplástica) ou xilema e floema (translocação apossimplástica). Em todas as situações a umidade do solo é imprescindível para boa translocação na planta. Por outro lado, há os herbicidas de curta mobilidade ou imóveis na planta, que permanecem quase no mesmo local da sua absorção.

Os herbicidas imóveis, no campo, são conhecidos como herbicidas de contato (ex.: diquat), e precisam de boa cobertura da planta pela aplicação. Boa cobertura significa que toda a planta precisa receber as gotas da pulverização, para que não ocorra rebrota de alguma parte da planta que ficou sem produto. Por isso, o volume de calda da aplicação deve ser adequado (maior que 150 L/ha), as gotas finas e, se indicado pelo fabricante, surfatantes (espalhante-adesivo) adicionados à calda.

INTERAÇÃO HERBICIDA-PLANTA

Seletividade

A escolha do tratamento químico (herbicida, associações de produtos, dosagem ou época de aplicação) também deve considerar a sua seletividade para a cultura de interesse econômico. Seletividade é a característica dos herbicidas que possibilita a sua aplicação para o controle de plantas daninhas sem causar danos às culturas (KOGAN ALTERMAN; PÉREZ JONES, 2003). A seletividade não é sempre atribuída ao herbicida em si, mas à dosagem aplicada e ao estágio de desenvolvimento das plantas, embora o solo, o clima, o uso de adjuvantes e o genótipo (híbrido, variedade, clone, etc.) também possam alterar o grau de seletividade.

A variabilidade de resposta entre genótipos da mesma espécie, na maioria das vezes, é explicada pela capacidade diferencial das plantas de alterar ou degradar a estrutura química do herbicida, por meio de reações que resultam em substâncias

não tóxicas, conhecida como seletividade metabólica (OLIVEIRA JÚNIOR; INOUE, 2011).

A seletividade depende de vários fatores, intrínsecos da planta ou externos do ambiente ou técnica de aplicação. Em relação aos fatores intrínsecos, estes estão relacionados com a alteração do sítio de ação, capacidade de metabolização ou desintoxicação, variação nas taxas de absorção e translocação do herbicida na planta, etc. Os fatores externos incluem a aplicação em épocas diferentes (ex.: aplicação de diquat antes da semeadura do feijão), aplicação localizada e protegida (ex.: aplicação de glyphosate em pomares de citros), uso de safener ou protetor na calda de pulverização ou no tratamento de sementes (ex.: tratamento de sementes de algodão com Permit[®] para promover seletividade ao herbicida clomazone), entre outros.

Em decorrência da manipulação genética, no entanto, criaram-se os organismos geneticamente modificados (transgênicos), que, dependendo da tecnologia e espécie, passaram a ter tolerância a herbicidas não seletivos, como o glyphosate (tecnologia Roundup Ready[®] - RR). Essa seletividade não é natural (originária da espécie) e, sim, induzida pelo homem na planta. Essa indução ocorre pela introdução de genes de outras espécies, como de bactérias, no caso da tecnologia RR, na espécie vegetal de interesse (KOGAN ALTERMAN; PÉREZ JONES, 2003). Com essa modificação genética, a planta adquire a capacidade de sobreviver à exposição ao herbicida. Por esse motivo, é importante constar nas bulas dos produtos comerciais que a condição de uso é apenas para as cultivares com a referida tecnologia de transgenia.

Absorção e translocação

Quando o herbicida é pulverizado em pós-emergência, primeiramente ocorre o contato da gota com a planta, que fica retida na superfície foliar. Após esse contato, a entrada do herbicida na folha dá-se por difusão através da cutícula, a principal bar-

reira de entrada do herbicida na planta. A cutícula recobre toda a folha, faces adaxial (parte superior) e abaxial (parte inferior), e tem a função de evitar a perda de água para o ambiente.

A cutícula é uma camada cerosa, de natureza lipofílica, que dificulta a entrada de moléculas, sobretudo as de natureza hidrofílicas. Porém, todas as moléculas, independentemente da sua polaridade (afinidade com água ou óleo - molécula polar ou apolar), conseguem atravessar a cutícula, com maior ou menor tempo de absorção. O processo de difusão é facilitado pela umidade do solo e do ar, que deixam a cutícula hidratada, menos lipofílica, com a formação de lamelas ou espaços aquosos, por onde os herbicidas de natureza polar (hidrofílica) se difundem (VIDAL, 2002).

Pouca quantidade do herbicida pulverizado entra na planta via estômato. Os estômatos são estruturas responsáveis pela troca gasosa. Logo, para entrar via estômato, a molécula precisa estar na forma de vapor e coincidir com a abertura do poro estomático.

Depois da travessia pela cutícula, a próxima barreira de entrada do herbicida é a parede celular da epiderme, na sequência a membrana plasmática, e somente após atravessá-la, o herbicida estará no simplasto da planta. A partir da epiderme a molécula alcançará as células dos outros tecidos (parênquima, por exemplo) via plasmodesmas. Plasmodesmas são estruturas que ligam as células, sem a necessidade de atravessar novamente a membrana plasmática e, assim, segue caminho até o seu sítio de ação.

O simplasto inclui organelas, citoplasma, membranas e floema, as partes “vivas” da planta. Já o apoplasto é formado pela cutícula, parede celular, espaços intercelulares e xilema, tidos como partes “não vivas” da planta.

O herbicida pode translocar na planta ou ficar restrito ao local de absorção. Na primeira situação, essa translocação pode ser via xilema, floema ou ambos (xilema e floema).

No xilema, o herbicida acompanha o fluxo de água e sais minerais. Com umidade no solo, as raízes absorvem água e a distribuem pela planta através do xilema. O movimento dá-se por diferença de potencial hídrico entre as células, a partir da perda de água para a atmosfera, em decorrência da evapotranspiração. Esse processo é explicado pela teoria coesão-tensão de ascensão da água (acrescida de íons e moléculas), pois considera as propriedades de coesão da água para suportar as tensões nas colunas de água no xilema (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A perda de água para o ambiente cria diferença de pressão até as células das raízes, onde se forma um vácuo que succiona a água e todos os íons e moléculas nesta dissolvidos para o interior das raízes, via pelos radiculares, principalmente.

Na Figura 1, tem-se a representação da translocação dos herbicidas pelo floe-

ma e xilema da planta e sem mobilidade (imóveis).

No caso da movimentação pelo floema, seja simplástica ou apossimplástica, o herbicida acompanha o fluxo de fotoassimilados, os açúcares da fotossíntese, conforme as relações de fonte e dreno (demanda). A translocação pelo floema dá-se por fluxo de pressão, ou seja, de um local com alta concentração de fotoassimilados (folhas), para outro com baixa concentração e necessidade de açúcares, como órgãos em crescimento e meristemas. Por isso, não há uma direção específica (ascendente ou descendente), depende do local da fonte e do dreno, e abrange toda a planta.

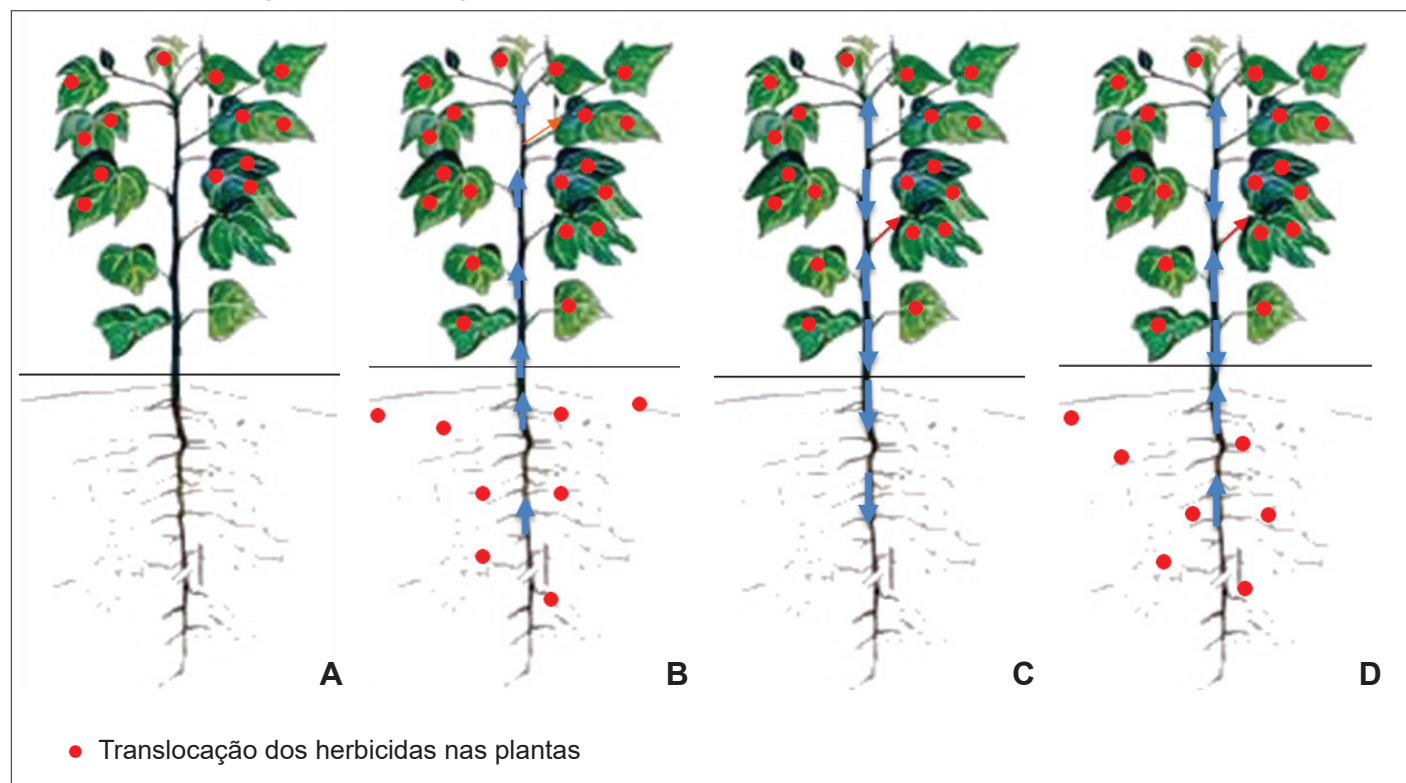
Para que a translocação pelo floema ocorra é importante que a planta esteja em plena atividade fotossintética, com água, temperatura adequada e luz. A intensidade ou quantidade dos fatores relacionados (água, temperatura e luz) é variável e

depende da espécie vegetal, em relação às características do seu metabolismo fotossintético (C3, C4 ou CAM) (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Mecanismo de ação de herbicidas

Mecanismo de ação ou sítio de ação de herbicidas é a primeira reação bioquímica ou biofísica inibida pelo herbicida, que resulta na morte ou ação final do produto. Trata-se da inibição primária (inicial) que desencadeia todos os distúrbios metabólicos na sequência. Modo de ação é a sequência completa de todas as reações que ocorrem desde o contato do herbicida com a planta até a sua morte ou ação final do produto. Portanto, inclui absorção, translocação, mecanismo de ação, todos os outros processos metabólicos inibidos, os primeiros sintomas de fitointoxicação e a morte da planta, se houver.

Figura 1 - Representação da translocação dos herbicidas



Fonte: Elaboração da autora.

Nota: A - Imóvel (ex.: diquat, lactofen, etc.); B - Translocação pelo xilema, com absorção pelas folhas e raízes (ex.: atrazine, metribuzin, etc.); C - Translocação pelo floema, com absorção pelas folhas (ex.: haloxyfop-methyl, glyphosate, etc.); D - Translocação pelo xilema e floema, com absorção pelas folhas e raízes (ex.: mesotrione, chlorimuron-ethyl, etc.).

Como exemplo, tem-se o herbicida glyphosate, que inibe a enzima 5-enolpiruvilshiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs), o que resulta na inibição da síntese dos aminoácidos essenciais triptofano, fenilalanina e tirosina, com prejuízos na produção de proteínas, vitaminas (K e E), hormônios (auxinas e etileno),

alcaloides e outros produtos essenciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas (KOGAN ALTERMAN; PÉREZ JONES, 2003; RODRIGUES; ALMEIDA, 2018). Portanto, o mecanismo de ação é a inibição da enzima EPSPs e todos os eventos posteriores contemplam o modo de ação.

No Quadro 1 são apresentados os compostos ou processos metabólicos inibidos e o mecanismo de ação dos herbicidas disponíveis no mercado brasileiro, com o grupo químico, exemplos de ingredientes ativos e a classificação pelo Comitê de Ação a Resistência aos Herbicidas (HRAC) global.

Quadro 1 - Compostos ou processos metabólicos inibidos e o mecanismo de ação dos herbicidas disponíveis no mercado brasileiro, com o grupo químico, exemplos de ingredientes ativos e a classificação pelo HRAC⁽¹⁾ (Continua)

Inibição	Mecanismo de ação	Grupo químico	Ingrediente ativo (Exemplos)	Classificação
Síntese de lipídios	Inibição da enzima acetil-CoA carboxilase (ACCCase)	Ciclohexanodiona Ariloxifenoxipropionato	Clethodim, sethoxydim Fluazifop-butyl, haloxyfop-methyl	A
Síntese dos aminoácidos valina, leucina e isoleucina	Inibição da enzima acetolactato sintase (ALS) ou acetohidroxiácido sintase (AHAS)	Phenilpirazoline Imidazolinonas Triazolopirimidina Sulfonilureias Pirimidiloxibenzoatos	Pinoxaden Imazapic, imazapyr, imazethapyr Cloransulam-methyl, diclosulam Chlorimuron-ethyl, sulfometuron-methyl Bispyribac-sodium, pyriithiobac-sodium	B
Fotossíntese	Inibição do fotossistema II (FSII) (Peroxidação de lipídios)	Triazina Triazinona Triazolinona Amida Derivados de ureia Benzotiadiazinona Nitrila	Ametryn, atrazine Hexazinone, metamitron, metribuzin Amicarbazone Propanil Diuron, linuron, tebuthiuron Bentazon Ioxynil	C1 C2 C3
Fotossíntese	Inibição do fotossistema I (FSI) (Peroxidação de lipídios)	Bipiridilo	Diquat	D
Síntese de porfirinas	Inibição da enzima protoporfirinogen oxidase (PPO) ou Prottox (Peroxidação de lipídios)	Difeniléter Ftalimida Oxadiazole Triazolinona Uracila	Fomesafen, lactofen, oxyfluorfen Flumiclorac-pentyl, flumioxazin Oxadiazon Carfentrazone-ethyl, sulfentrazone Saflufenacil	E
Síntese de carotenoides (formação de radicais livres)	Inibição da enzima p-hidroxifenilpiruvato dioxigenase (HPPD) Inibição da enzima 1-desoxi-d-xilulose 5-fosfato sintase (DOXPs)	Isoxazole Tricetona Isoxazolidinona	Isoxaflutole Mesotrione, tembotrione Clomazone	F2 F4
Síntese dos aminoácidostriptofano, fenilalanina e tirosina	Inibição da enzima 5-enolpiruvilshiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs)	Derivados da glicina	Glyphosate	G

Quadro 1 - Compostos ou processos metabólicos inibidos e o mecanismo de ação dos herbicidas disponíveis no mercado brasileiro, com o grupo químico, exemplos de ingredientes ativos e a classificação pelo HRAC⁽¹⁾ (Conclusão)

Inibição	Mecanismo de ação	Grupo químico	Ingrediente ativo (Exemplos)	Classificação
Síntese do aminoácido glutamina	Inibição da enzima glutamina sintetase (GS)	Ácidos fosfínicos	Amônio-glufosinato	H
Síntese de ácido fólico	Inibição da diidropteroato sintase (DHP)	Carbamato	Asulam	I
Mitose	Inibição da formação de microtúbulos	Dinitroanilina	Pendimethalin, trifluralin	K1
Síntese de lipídios	Inibição da síntese de ácidos graxos de cadeia longa	Cloroacetamida	Alachlor, s-metolachlor	K3
Síntese de parede celular	Inibição da síntese de celulose	Alquilazina	Indaziflam	L
Auxinas sintéticas	Mimetizador de auxina	Ácido benzoico	Dicamba	O
		Ácido fenoxiacético	2,4-D	
		Ácido piridinocarboxílico	Picloram, aminopyralid	
		Ácido piridiniloxialcanoico	Triclopyr, fluroxypyr	
		Ácido quinolinocarboxílico	Quinclorac	
Síntese de ácidos nucleicos	Desconhecido	Organoarsenical	MSMA	Z

Fonte: Adaptado de Diez de Ulzurrun (2013), Rodrigues e Almeida (2018) e Heap (2021).

(1) Comitê de Ação a Resistência aos Herbicidas (global).

Embora os herbicidas inibidores dos fotossistemas I e II (FSI e FSII) e da enzima protoporfirinogen oxidase (PPO) possuam sítios de ação diferentes, estes ocasionam o mesmo efeito letal na planta, em decorrência da formação de radicais livres, altamente reativos, que reagem com os lipídios de membranas e ocasionam a peroxidação dos lipídios. Radicais livres referem-se à clorofila “triplet” ou “singlet”, superóxido (O_2^-), radicais hidroxila (OH^*), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), oxigênio reativo ou “singlet” (1O_2) (VIDAL; MEROTTO JÚNIOR, 2001). Em decorrência da rápida ação na planta, esses herbicidas são imóveis ou móveis pelo xilema e nenhum destes é móvel pelo floema. A mortalidade das plantas sensíveis é rápida, e os sintomas iniciais são similares, como manchas necróticas nas folhas.

RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS A HERBICIDAS

A resistência de plantas daninhas a herbicidas é um dos grandes desafios da

agricultura no momento, tanto no Brasil como nos outros países. Mas, primeiramente, é importante diferir tolerância de resistência de plantas daninhas, que é muito confundido no campo. A tolerância refere-se à característica inata da espécie em sobreviver a aplicações de herbicida na dosagem recomendada, que seria letal a outras espécies, sem alterações marcantes em seu crescimento e desenvolvimento (CHRISTOFFOLETI; LÓPEZ-OVEJERO, 2008).

Várias espécies de plantas daninhas são tolerantes ao herbicida glyphosate, como corda-de-violão (espécies dos gêneros *Ipomoea* e *Merremia*), erva-de-touro (*Tridax procumbens*), erva-quente (*Spermacoce latifolia*), guanxuma (*Sida* spp.), poaia-branca (*Richardia brasiliensis*), trapoeraba (*Commelina benghalensis*), vassourinha-de-botão (*Spermacoce* spp.), entre outras. Isto indica que, dependendo do tamanho da planta e da dosagem do herbicida, este pode (ou não) ser eficaz.

Na dosagem de bula, de forma geral, plantas pequenas (2 a 3 folhas) das espécies tolerantes são controladas pelo glyphosate. No entanto, à medida que a planta cresce o controle não é mais observado. Por isso, para o controle efetivo, o glyphosate deve ser aplicado em plantas pequenas, na pós-emergência precoce e inicial ou no máximo pós-normal, e não em plantas adultas, como acontece na maioria das situações de campo, seja na “dessecação” pré-semeadura de culturas no sistema de plantio direto ou nas entrelinhas de culturas perenes, como café e citros.

Em relação à resistência, trata-se da capacidade inerente e herdável de alguns biótipos, dentro de uma determinada população, de sobreviver e se reproduzir após a exposição a dosagens de um herbicida, que normalmente seriam letais a uma população normal (sensível) da mesma espécie (CHRISTOFFOLETI; LÓPEZ-OVEJERO, 2008). A resistência é um fenômeno natural que ocorre espontanea-

mente nas populações, não sendo, portanto, o herbicida o agente causador, mas, sim, selecionador dos indivíduos resistentes que se encontram em baixa frequência inicial (CHRISTOFFOLETI; VICTORIA FILHO; SILVA, 1994).

O uso exclusivo e frequente de herbicidas com o mesmo mecanismo de ação contribuiu para o aumento da pressão de seleção de biótipos resistentes de uma determinada espécie (Fig. 2). Nesse caso, mesmo aumentando a dosagem do herbicida ou pulverizando em plantas menores, o controle é ineficaz.

O biótipo resistente, por outro lado, também pode ser introduzido na área agrícola pela sua disseminação natural (sementes facilmente levadas pelo vento, por exemplo) ou pela maquinaria, em especial, as colhedoras. No processo de colheita das culturas, as máquinas ficam sujas com resíduos vegetais de plantas daninhas, entre estes frutos e sementes. Se a máquina não for devidamente limpa, esses resíduos serão disseminados para outras áreas, seja dentro da mesma fazenda seja de uma fazenda para outra. A movimentação de colhedoras no Brasil

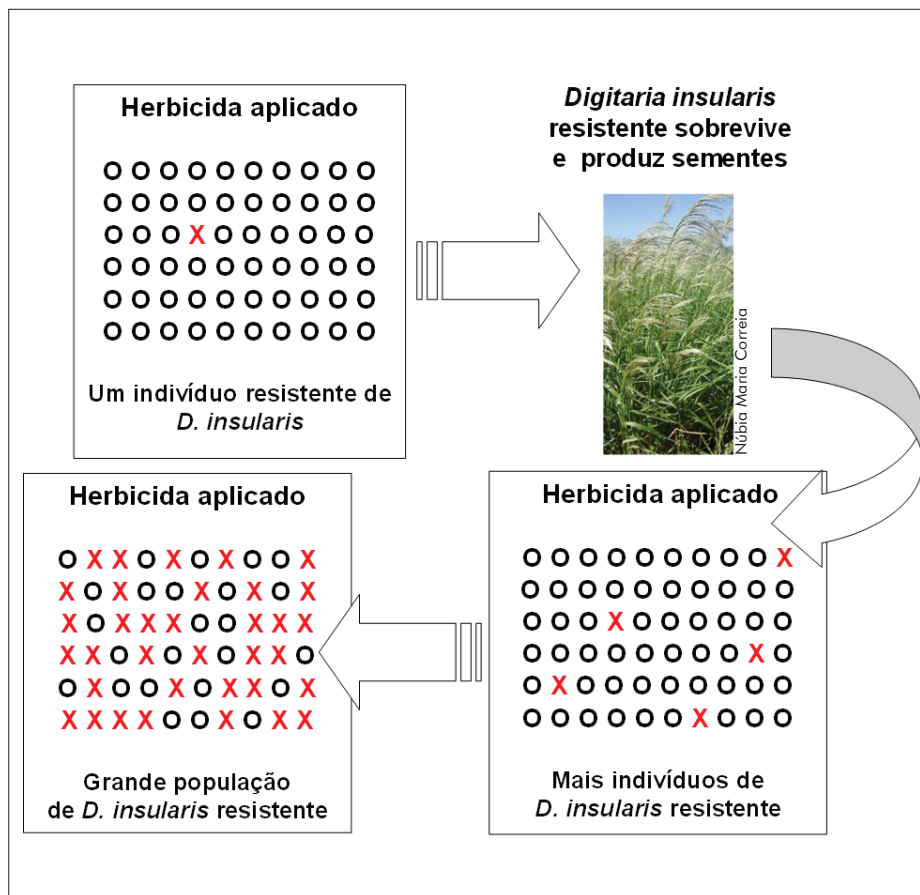
pode justificar a evolução dos casos de resistência de capim-amargoso do Sul para o Centro-Oeste e Norte.

Até o ano de 2021, 508 casos de biótipos de plantas daninhas resistentes a herbicidas já foram registrados no mundo, para 266 espécies (153 dicotiledôneas e 113 monocotiledôneas), distribuídos em 92 culturas em 70 países (HEAP, 2021). No Brasil, 47 casos de resistência foram relatados até o momento, para 29 espécies de plantas daninhas, sobretudo nas culturas de soja, milho, algodão e trigo (HEAP, 2021). Os dados atualizados podem ser obtidos no site¹ intitulado The International Herbicide-Resistant Weed Database mantido pelo pesquisador Ian Heap, em colaboração com o HRAC global e de outros pesquisadores distribuídos pelo mundo.

No Quadro 2 são apresentados os casos de resistência simples e múltipla de plantas daninhas ao herbicida glyphosate no Brasil. A resistência simples refere-se unicamente ao glyphosate, e a múltipla, a dois ou mais mecanismos de ação diferentes. Até o ano de 2021, foram relatados 19 casos de resistência de dez espécies de plantas daninhas, sendo capim-amargoso (*Digitaria insularis*) e buva (*Conyza* spp.) as resistentes com maior expressão e distribuição pelo País.

O primeiro relato oficial de resistência deve seguir normas e critérios estabelecidos pelo comitê de resistência da Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas (SBCPD), que reúne pesquisadores e estudiosos da área, e pelo HRAC Brasil (HRAC-BR), constituído por representantes da indústria (GAZZIERO; GALLI; KARAM, 2008). O primeiro relato de resistência é um indicativo de problema regional, estadual ou de todo o País, a médio e longo prazo. Assim, não significa que todas as áreas de produção tenham o problema, mas, dependendo do manejo da área, poderá tê-lo.

Figura 2 - Representação do aumento da infestação dos indivíduos resistentes (X) da planta daninha em uma área agrícola, comparado ao declínio dos indivíduos suscetíveis (O), em função da aplicação contínua e frequente de herbicidas com o mesmo mecanismo de ação



Fonte: Elaboração da autora.

Nota: O exemplo é da espécie capim-amargoso (*Digitaria insularis*) resistente ao herbicida glyphosate.

¹ www.weedscience.org.

Quadro 2 - Espécie de planta daninha, nome popular, ano e local do primeiro relato de resistência ao herbicida glyphosate no Brasil, casos de resistência simples e múltipla

Espécie	Nome popular	Ano	Mecanismo de ação	Local
1. <i>Lolium perenne</i> ssp. <i>multiflorum</i>	Azevém	2003	Inibidor da EPSPs	RS
2. <i>Conyza bonariensis</i>	Buva	2005	Inibidor da EPSPs	RS, SP
3. <i>Conyza canadensis</i>	Buva	2005	Inibidor da EPSPs	SP
4. <i>Digitaria insularis</i>	Capim-amargoso	2008	Inibidor da EPSPs	PR
5. <i>Lolium perenne</i> ssp. <i>multiflorum</i>	Azevém	2010	Inibidor da ACCase Inibidor da EPSPs	RS
6. <i>Conyza sumatrensis</i>	Buva	2010	Inibidor da EPSPs	PR
7. <i>Conyza sumatrensis</i>	Buva	2011	Inibidor da ALS Inibidor da EPSPs	PR
8. <i>Chloris elata</i>	Capim-branco	2014	Inibidor da EPSPs	SP, PR
9. <i>Amaranthus palmeri</i>	Caruru-palmeri	2015	Inibidor da EPSPs	MT
10. <i>Eleusine indica</i>	Capim-pé-de-galinha	2016	Inibidor da EPSPs	PR
11. <i>Amaranthus palmeri</i>	Caruru-palmeri	2016	Inibidor da ALS Inibidor da EPSPs	MT
12. <i>Lolium perenne</i> ssp. <i>multiflorum</i>	Azevém	2017	Inibidor da ALS Inibidor da EPSPs	RS
13. <i>Conyza sumatrensis</i>	Buva	2017	Inibidor da ALS Inibidor do FSI Inibidor da EPSPs	PR
14. <i>Eleusine indica</i>	Capim-pé-de-galinha	2017	Inibidor da ACCase Inibidor da EPSPs	MT
15. <i>Conyza sumatrensis</i>	Buva	2017	Inibidor do FSII Inibidor do FSI Inibidor da Prottox ou PPO Inibidor da EPSPs Auxina sintética	PR
16. <i>Amaranthus hybridus</i>	Caruru-roxo	2018	Inibidor da ALS Inibidor da EPSPs	RS, PR
17. <i>Euphorbia heterophylla</i>	Amendoim-bravo	2019	Inibidor da EPSPs	PR
18. <i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i>	Capim-arroz	2020	Inibidor da EPSPs	RS
19. <i>Digitaria insularis</i>	Capim-amargoso	2020	Inibidor da ACCase Inibidor da EPSPs	MT MS

Fonte: Adaptado de Heap (2021) e Adegas *et al.* (2020).

Nota: EPSPs - Enzima 5-enolpiruvilshiquimato 3-fosfato sintase; ACCase - Enzima acetil-CoA carboxilase; ALS - Enzima acetolactato sintase; FSI - Fotossistema I; FSII - Fotossistema II; Prottox ou PPO - Enzima protoporfirinogen oxidase.

INTERAÇÃO HERBICIDA-AMBIENTE

Após a pulverização, os herbicidas estão sujeitos a uma série de processos ou fenômenos que podem levar a perdas, intoxicação ou poluição ambiental. É óbvio

que esses produtos não foram desenvolvidos para a finalidade de intoxicação ou poluição ambiental. Quando isto ocorre no campo é porque houve o manejo errado dos produtos. Para exercer a sua função, que é controlar as plantas daninhas, o herbicida

deve atingir o alvo da pulverização (e não ficar fora deste).

Nas aplicações em pós-emergência, parte do produto fica retida nas plantas e o restante atinge o solo. Assim, seja em pré ou pós-emergência, o reservatório final dos

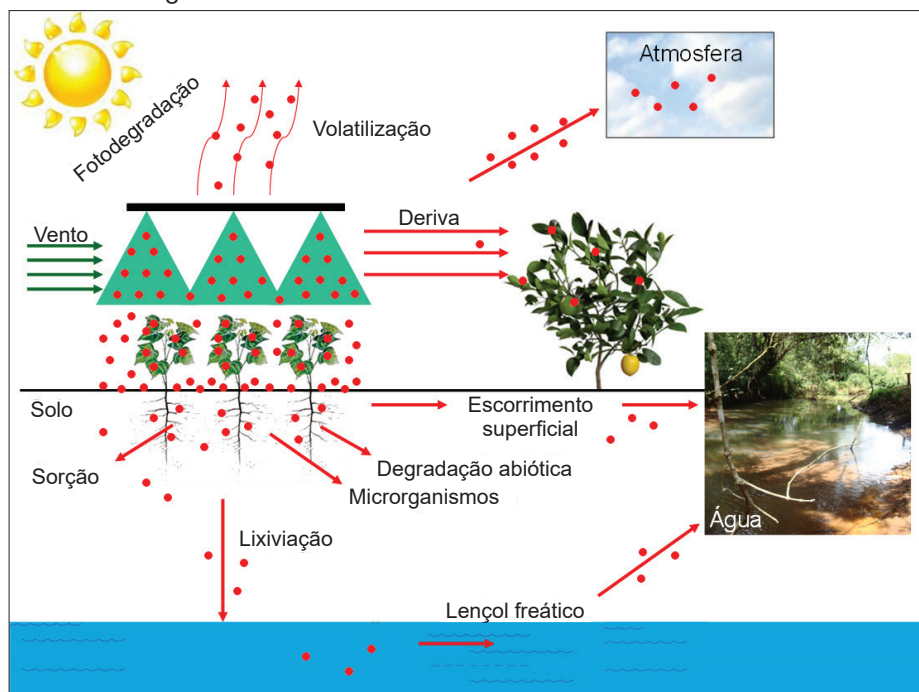
herbicidas no ambiente é o solo. Esse fato é importante, pois é no solo que a molécula do herbicida será degradada a uma forma não tóxica. Essa degradação é um processo natural, comum para todos os produtos, e não apenas para os mais modernos. O que existe é uma variação (de herbicida para herbicida) do tempo que o processo de transformação ocorrerá no solo, podendo ser mais longo para alguns herbicidas ou mais curto para outros.

A dinâmica dos herbicidas no ambiente (sistema solo-água-atmosfera) está apresentado na Figura 3. Após (ou no momento) da aplicação no campo, a molécula do herbicida pode ser transportada, transformada ou retida (SILVA; VIVIAN; OLIVEIRA JÚNIOR, 2007). No transporte a molécula é desviada do alvo da aplicação, mas continua ativa (tóxica). A transformação trata-se da degradação da molécula, a qual perde a atividade biológica (capacidade de matar a planta daninha). E, na retenção, o herbicida é adsorvido (retido, aderido) à fração sólida do solo (argila ou MO), ou absorvido pelas plantas ou outros organismos vivos.

Caso o herbicida não tenha sido aplicado diretamente na água, o produto somente atingirá um manancial hídrico em superfície (como lagoas, represas, córregos e rios) se houver algum erro na aplicação ou erosão hídrica (enxurrada). Na água, o herbicida também será degradado, rápida ou lentamente, da mesma forma que no solo, o tempo é variável de molécula para molécula. É um erro achar que os herbicidas são produtos químicos que permanecem indefinidamente no solo ou na água, contaminando áreas de cultivo e mananciais hídricos, com consequentes danos irreversíveis ao meio ambiente.

A molécula do herbicida pode ser desviada do alvo da pulverização por diferentes formas. Inicialmente, já no momento da aplicação, o produto pode ser perdido para o ambiente por meio da deriva. Contrário aos fungicidas e inseticidas, a deriva da aplicação de um herbicida pode ter ação fitotóxica em culturas vizinhas sensíveis. A deriva é definida como o depósito de agro-

Figura 3 - Resumo esquemático da dinâmica dos herbicidas no sistema solo-água-atmosfera



Fonte: Elaboração da autora.

químicos fora do alvo da aplicação durante um tratamento fitossanitário (ANTUNIAS-SI; BAIQ, 2008). Além do prejuízo agrônômico, pela perda de eficácia, pois o produto não atingirá o alvo em concentração adequada, tem-se o prejuízo da contaminação. No momento da aplicação a molécula do herbicida também pode ser perdida para a atmosfera por volatilização (vaporização). O produto passa para a forma de vapor, mas a sua propriedade tóxica é preservada, pois é apenas uma mudança de estado físico da matéria. Observações a campo indicaram que esse “vapor tóxico” pode contaminar uma cultura sensível até 15 km do local de aplicação (deriva química) ou retornar ao solo junto com a água da chuva, no processo de condensação das moléculas.

Os prejuízos relacionados com deriva e volatilização, contudo, só ocorrem no campo em condições não apropriadas de pulverização, como UR do ar < 55%, temperatura do ar > 30 °C e velocidade do vento acima da indicada para a tecnologia de aplicação adotada. Principalmente, no que se refere ao tamanho das gotas, que pode ser mais ou menos propensa a perdas

por deriva. Por exemplo, pontas de pulverização com indução de ar geram gotas extremamente grossas, sendo menos favoráveis a perdas por deriva e toleram uma condição maior de vento comparado a gotas finas. O herbicida é um produto seguro, desde que usado de forma adequada, respeitando-se as dosagens recomendadas e as condições edafoclimáticas no momento da aplicação.

O herbicida também pode mover-se no solo, dependendo da sua interação com a fase sólida e solução. Se a retenção do herbicida à fase sólida é fraca, maior concentração deste estará na solução, na qual é mais propenso a perdas pelos movimentos vertical e horizontal no solo, denominados lixiviação (transporte em profundidade - vertical, dentro do solo) e escoamento superficial. Nas duas situações, o risco ambiental é a contaminação dos mananciais hídricos de superfície (lago, rios, córregos, etc.) ou subterrâneo (cisternas e poços artesianos). A solubilidade em água e o caráter químico da molécula do herbicida regulam essa mobilidade. Por outro lado, a movimentação do herbicida nos primeiros centímetros do solo (até

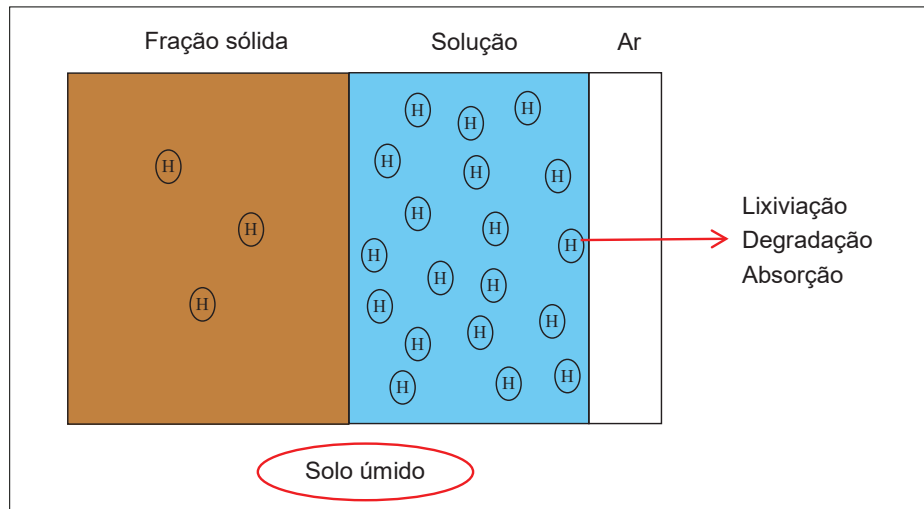
10 cm) é benéfica, pois confere melhor distribuição do produto na camada do solo potencial para germinação de sementes de plantas daninhas.

De forma simplificada, o solo é constituído pela fração sólida (argila, silte, areia e MO), solução (água do solo) e ar (principalmente CO_2 e O_2). No solo, o herbicida pode ocupar esses três espaços, como mostra a Figura 4. Para ser lixiviada, a molécula deve estar dissolvida na água do solo, pois, quando retida (adsorvida) à argila ou à MO, está protegida desse tipo de perda. Por isso, as duas características, solubilidade em água e adsorção ao solo são importantes e devem ser avaliadas em conjunto e não separadamente. Herbicidas fortemente adsorvidos ao solo, mesmo extremamente solúveis em água, não estão propensos a perdas por lixiviação no solo.

No estudo desenvolvido na sub-bacia hidrográfica do Rio Samambaia no Distrito Federal (DF) e leste de Goiás (GO), para identificar e quantificar resíduos de herbicidas em amostras de águas de chuva, cisterna, córrego, lagoa, nascente, represa, poço artesiano e rio, constatou-se que, dos 26 compostos analisados, o metribuzin foi o que teve maior frequência de detecção, em 65% das 287 amostras de água (CORREIA; CARBONARI; VELINI, 2020). No entanto, embora a frequência de detecção fosse alta, os valores quantificados foram menores que o limite de quantificação do herbicida. Esse fato indica que o composto foi detectado na amostra, mas as quantidades foram extremamente baixas.

O metribuzin é o principal herbicida das culturas de batata e tomate, e é usado, nessas culturas, em quase 20% das propriedades rurais avaliadas. A alta frequência das amostras de água com metribuzin estava associada ao manejo das hortaliças, sobretudo, exaustivo preparo do solo, como aração, gradagem e enxada rotativa (para batata) e aplicação do metribuzin em pré-emergência, direto ao solo, que pode favorecer as perdas do produto por lixiviação e escurimento superficial (CORREIA; CARBONARI; VELINI, 2020). As características físicas e químicas do metribuzin,

Figura 4 - Esquema da distribuição das moléculas do herbicida adsorvido à fração sólida ou dissolvido na solução (água)



Fonte: Elaboração da autora.

como fraca adsorção ao solo e solubilidade em água muito alta, também afetam a sua maior persistência e contaminação dos corpos hídricos.

É necessário ser criterioso não apenas na escolha do produto usado na cultura em questão, mas com os herbicidas pulverizados nas áreas vizinhas (para evitar possíveis prejuízos causados por deriva ou volatilização) e com aqueles pulverizados nas culturas antecessoras. Herbicidas com maior persistência no solo poderão afetar o estabelecimento das culturas em rotação ou sucessão. Esse fenômeno é denominado *carryover*, e pode ser definido como os resíduos fitotóxicos que permanecem no solo e que afetam culturas sensíveis em rotação ou sucessão após aquelas culturas em que foi utilizado o herbicida (SANTOS *et al.*, 2007). Nos sistemas de produção, em que diferentes culturas ocupam o mesmo local ao longo do ano, o uso de herbicidas com residual longo no solo poderá inviabilizar o cultivo de alguma cultura em sucessão ou rotação. Então, a degradação da molécula do herbicida é importante não apenas para o ambiente, mas também para a agricultura.

As principais formas de transformação da molécula são: abiótica (ou química), microbiana (ou biodegradação) ou pela ação da luz (fotodegradação). Nas três, a degradação ocorre por meio de reações

químicas (hidrólise, oxidação, redução, etc.) que resultará em uma forma não tóxica da molécula ou até a sua completa mineralização, tendo como produtos finais CO_2 , água (H_2O), amônia (NH_3) e íons inorgânicos. A biodegradação é a via natural de transformação dos produtos a uma forma não tóxica. Em um ambiente não favorável aos microrganismos do solo, como seca, temperaturas baixas e pH mais ácido, a atividade da microbiota decompositora será menor; consequentemente, o herbicida permanecerá por mais tempo (ativo) no solo.

Dependendo da molécula de herbicida, esta pode permanecer no solo na forma tóxica por longo período, inviabilizando o cultivo de culturas sensíveis em sucessão ou rotação. Uma técnica usada para descontaminar solos ou água com resíduo de herbicida é a fitorremediação, que consiste no uso de espécies vegetais, que irão absorver, acumular e/ou metabolizar o herbicida. Com isto, culturas sensíveis poderão ser instaladas em sucessão ou rotação, em decorrência da despoluição do solo. Nesse sentido, o cultivo prévio de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) reduziu os efeitos tóxicos em solo contaminado com sulfentrazone (FERRAÇO *et al.*, 2017). Este herbicida é registrado para as culturas de abacaxi, café, cana-de-açúcar, citros, fumo,

soja e eucalipto, e pode deixar resíduo no solo de até 18 meses para a cultura do algodão, dependendo de diversos fatores, como principalmente da dosagem pulverizada (RODRIGUES; ALMEIDA, 2018).

Na busca por uma agricultura ambientalmente aceitável, preconiza-se, portanto, que a aplicação de herbicidas no agroecossistema considere outros fatores, além da planta daninha ou da cultura a ser pulverizada, tais como:

- a) profundidade do lençol freático (se este é mais superficial, não usar produtos com maior solubilidade em água);
- b) presença de nascentes ou minas d'água, práticas conservacionistas de solo (como o Sistema Plantio Direto na Palha);
- c) relevo do terreno (dependendo do grau de inclinação do terreno e do tipo de solo, aplicar os herbicidas após a emergência das plantas), etc.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento da infestação é imprescindível para a definição das estratégias de manejo, com posicionamentos distintos para cada caso específico. A realização de mapas de infestação contendo as principais espécies de plantas daninhas e seus níveis de infestação e as características químicas e físicas do solo é de grande importância, com reflexos a médio e a longo prazos na dinâmica das plantas daninhas. O monitoramento da infestação também é necessário para evitar a evolução de casos de resistência e modificação de flora na área.

Controlar não é o mesmo que manejar. O controle consiste na supressão do crescimento e/ou redução do número de plantas daninhas na área até níveis aceitáveis para convivência, sem ocasionar danos à cultura. O manejo engloba a adoção de várias estratégias de controle, procurando-se trabalhar de forma integrada. Exige a avaliação de todos os impactos a médio e a longo prazos no agroecossistema. O ajuste das dosagens dos herbicidas em função do tipo de solo, da espécie e do tamanho da

planta daninha, associado ao levantamento prévio da infestação, exemplifica estratégias de manejo integrado.

O uso de herbicidas exige profissionais que entendam a dinâmica dos produtos no sistema solo-água-atmosfera e não têm o herbicida como única estratégia de manejo. Quem não age dessa forma, está fadado ao insucesso, em virtude da seleção de plantas daninhas resistentes ou de difícil controle e com o aumento exponencial do “banco de sementes” do solo. Além do aumento sucessivo das dosagens, do uso de misturas triplices ou quádruplas no tanque do pulverizador, com reflexo direto no custo de produção. “Tem que conhecer para saber usar e usar sempre”. Sem ideologismos ou falsas promessas, não existem milagres e, sim, estratégias integradas: o Manejo Integrado de Plantas Daninhas, no qual os herbicidas fazem parte, combinados a outros métodos de manejo.

REFERÊNCIAS

- ADEGAS, F.S. *et al.* **Euphorbia heterophylla**: um novo caso de resistência ao glifosato no Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2020. 5p. (Embrapa Soja. Comunicado Técnico, 98).
- KOGAN ALTERMAN, M.; PÉREZ JONES, A. **Herbicidas**: fundamentos fisiológicos y bioquímicos del modo de acción. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003. 333 p.
- ANTUNIASSI, U.A.; BAILO, F.H.R. Tecnologia de aplicação de defensivos. *In*: VARGAS, L.; ROMAN, E.S. (ed.). **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. cap. 7, p.173-212.
- CHRISTOFFOLETI, P.J.; LÓPEZ-OVEJERO, R.F. Resistência das plantas daninhas a herbicidas: definições, bases e situação no Brasil e no mundo. *In*: CHRISTOFFOLETI, P.J. (coord.). **Aspectos de resistência de plantas daninhas a herbicidas**. 3.ed. Piracicaba: HRAC-BR, 2008. cap.1, p.9-34.
- CHRISTOFFOLETI, P.J.; VICTORIA FILHO, R.; SILVA, C.B. da. Resistência de plantas daninhas aos herbicidas. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v.12, n.1, p.13-20, 1994.
- CORREIA, N.M.; CARBONARI, C.A.; VELINI, E.D. Detection of herbicides in water bodies of the Samambaia River sub-basin in the Federal District and eastern Goiás. **Journal of Environmental Science and Health - Part B. Pesticides Food Contaminants, and Agricultural Wastes**, v.55, n.6, p.574-582, Mar. 2020.
- DIEZ DE ULZURRUN, P. **Manejo de malezas problema**: modos de acción herbicida. Rosario, Argentina: REM, 2013. 52 p.
- FERRAÇO, M. *et al.* Efeito da densidade populacional de *Canavalia ensiformis* na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.48, n.1, p.32-40, jan./mar. 2017.
- GAZZIERO, D.L.P.; GALLI, A.J.B.; KARAM, D. (ed.). **Critérios para relatos oficiais estatísticos de biótipos de plantas daninhas resistentes a herbicidas**. Sete Lagoas: SBCPD; Campinas: HRAC-BR, 2008. 22p.
- HEAP, I. **The international herbicide-resistant weed database**. [S.l.]: The International Survey of Herbicide Resistant Weeds, 2021. Disponível em: <http://www.weedscience.org/default.aspx>. Acesso em : 24 out. 2021.
- OLIVEIRA JÚNIOR, R.S. de; INOUE, M.H. Seletividade de herbicidas para culturas e plantas daninhas. *In*: OLIVEIRA JÚNIOR., R.S. de; CONSTANTIN, J.; INOUE, M.H. (ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. cap.10, p.243-262.
- RODRIGUES, B.N.; ALMEIDA, F.L.S. **Guia de herbicidas**. 7.ed. Londrina: Ed. dos autores, 2018. 764 p.
- SANTOS, J.B. dos *et al.* Fitorremediação de áreas contaminadas por herbicidas. *In*: SILVA, A.A. da; SILVA, J.F. da (ed.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2007. cap. 6, p.249-278.
- SILVA, A.A. da; VIVIAN, R.; OLIVEIRA JÚNIOR, R.S. de. Herbicidas: comportamento no solo. *In*: SILVA, A.A. da; SILVA, J.F. da (ed.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2007. cap.5, p.189-248.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.
- VIDAL, R.A. **Ação dos herbicidas**: absorção, translocação e metabolização. Porto Alegre: Evangraf, 2002. v.1, 89p.
- VIDAL, R.A.; MEROTTO JÚNIOR, A. (ed.). **Herbicidologia**. Porto Alegre: Evangraf, 2001. 152p.