

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”
PACES - PROJETANDO AGRICULTURA COMPROMISSADA EM
SUSTENTABILIDADE

Mariana Faria Miyazaki

Sophia Bez Ribeiro

Herbicidas inibidores da ACCase

Piracicaba

2024

MARIANA FARIA MIYAZAKI

SOPHIA BEZ RIBEIRO

Herbicidas inibidores da ACCase

Revisão bibliográfica apresentada ao PACES
- Projetando Agricultura Compromissada em
Sustentabilidade, na Esalq - Escola Superior
de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP -
Universidade de São Paulo, no
Departamento de Ciências do Solo (LSO).

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

Coordenadores: Kaio Eduardo P. Álvares e
Thales Góes P. de Souza.

Piracicaba

2024

RESUMO: Os inibidores da ACCase são herbicidas fundamentais na agricultura devido à sua capacidade de controlar eficazmente gramíneas, enquanto costumam ser seletivos para culturas dicotiledôneas. Divididos em ariloxifenoxipropionatos (APPs) e ciclohexanodionas (CHDs), esses compostos atuam inibindo a enzima acetil-CoA carboxilase (ACCase), essencial para a síntese de lipídeos nas plantas. Esse processo é crucial para o desenvolvimento das membranas celulares e outras funções vitais. Gramíneas são particularmente suscetíveis devido à sua estrutura da ACCase, enquanto dicotiledôneas possuem formas que permitem tolerância. A aplicação pós-emergente desses herbicidas é comum, geralmente resultando em sintomas como clorose e desintegração dos meristemas em gramíneas sensíveis. Estratégias de mistura em tanque com outros herbicidas são utilizadas para melhorar a eficácia, embora às vezes possam resultar em antagonismo. A resistência das plantas daninhas a esses herbicidas é uma preocupação crescente, com biótipos resistentes surgindo em várias partes do mundo, exigindo práticas de manejo integrado para mitigar seu impacto na agricultura.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES.....	5
3 MECANISMO E MODO DE AÇÃO.....	8
3.1 SINTOMATOLOGIA	8
4 SELETIVIDADE	11
5 RESISTÊNCIAS.....	15
6 MISTURAS EM CALDA	19
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	22
REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

Os herbicidas que inibem a enzima Acetil CoA Carboxilase (ACCase) são amplamente utilizados como graminicidas de ação sistêmica em pós-emergência em culturas dicotiledôneas. Introduzidos no mercado pela primeira vez em 1978 com o lançamento do diclofop-metil, esses herbicidas pertencem aos grupos químicos dos ariloxifenoxypropionatos (FOPs), ciclohexanodionas (DIMs) e fenilpirazolinias (DENs). Eles são classificados como grupo 1/A de acordo com o HRAC. No Brasil, esses herbicidas são registrados para uso em culturas de milho e soja (Almeida; Ferrão, 2022).

Em plantas sensíveis, os herbicidas inibidores da ACCase interrompem a atividade da enzima responsável pela conversão de Acetil Coenzima-A em Malonil Coenzima-A, comprometendo a síntese de lipídios na planta. Após a aplicação, esses herbicidas são rapidamente absorvidos pelas folhas e translocados para os tecidos meristemáticos, onde a ACCase é mais ativa. A translocação ocorre via floema e xilema, com sintomas de clorose surgindo nas folhas dentro de uma semana, seguidos de necrose e desintegração das folhas (Almeida; Ferrão, 2022).

A eficácia dos herbicidas inibidores da ACCase no controle de gramíneas deve-se à sua inibição seletiva da ACCase plastídica heteromérica, uma forma específica da enzima presente em plantas monocotiledôneas. Essa seletividade permite que as dicotiledôneas tolerem esses herbicidas, uma vez que possuem formas de ACCase citosólicas homoméricas, que não são afetadas. No entanto algumas exceções ocorrem devido à inibição seletiva da ACCase citosólica homomérica, afetando certas espécies suscetíveis das famílias Geraniaceae, Brassicaceae e do gênero *Arabidopsis* (Almeida; Ferrão, 2022).

2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

Os herbicidas mencionados são conhecidos como inibidores da síntese de lipídeos ou ácidos graxos, divididos em dois grupos químicos distintos: os ariloxifenoxipropionatos (APPs), introduzidos nos anos 1970, e as ciclohexanodionas (CHDs), que surgiram nos anos 1980. Apesar das diferenças químicas, ambos grupos apresentam semelhanças marcantes em termos de espectro de controle, eficiência, seletividade e modo de ação (Oliveira Jr., 2011).

Esses herbicidas são classificados como sistêmicos, atuando no controle tanto de gramíneas anuais quanto perenes, variando sua eficácia conforme a espécie. Geralmente, espécies não gramíneas (sejam plantas daninhas ou culturas) são tolerantes a esses compostos. Em aplicações pós-emergência, as doses costumam ser baixas, exceto quando se buscam controlar gramíneas perenes, momento em que doses mais elevadas podem ser necessárias. A penetração nas plantas ocorre basicamente por via foliar. Possuem atividade no solo baixa ou nula, não sendo utilizados nesta modalidade de aplicação (Oliveira Jr., 2011).

Os produtos são conhecidos pela sua versatilidade no momento da aplicação, permitindo eficácia tanto em estágios iniciais quanto em estágios mais avançados de crescimento das gramíneas. Embora o período de sensibilidade seja geralmente entre 3 a 5 folhas, sua capacidade de controlar plantas maiores adiciona flexibilidade ao manejo de plantas daninhas. Além disso, a velocidade de crescimento das gramíneas no momento da aplicação pode ser crucial, às vezes superando a importância do estágio específico de desenvolvimento (Oliveira Jr., 2011).

É importante considerar também as interações potenciais quando esses herbicidas são combinados em tanque com outros produtos, como os herbicidas latifolicidas. Em algumas situações, essa mistura pode resultar em antagonismo, diminuindo a eficácia no controle das gramíneas. Para otimizar a absorção e a translocação desses herbicidas nas plantas, frequentemente são adicionados adjuvantes às misturas, melhorando assim a eficiência e o resultado do tratamento herbicida no campo. Essas estratégias são essenciais para o manejo eficaz das plantas daninhas e para manter a produtividade das culturas agrícolas (Oliveira Jr., 2011).

As plantas da família Poaceae, conhecidas como gramíneas, possuem uma enzima chamada ACCase (acetil-CoA carboxilase) plastídica homomérica. Isso

significa que os componentes BCCP, BC e CT da ACCase estão todos localizados em uma única cadeia polipeptídica da proteína. Nas gramíneas, tanto a ACCase plastídica quanto a citoplasmática se tornam ativas quando formam um dímero homodimérico (Christoffoleti, 2016).

Por outro lado, nas demais plantas (geralmente dicotiledôneas), a forma da ACCase é diferente. Elas possuem uma forma homomérica no citoplasma e uma forma heteromérica (ou procariótica) nos plastídeos. Isso significa que os componentes da ACCase são codificados por genes diferentes, expressos de maneira coordenada. Essa diferença na estrutura da ACCase é uma das razões pelas quais as gramíneas são particularmente suscetíveis aos herbicidas inibidores da ACCase, enquanto as dicotiledôneas são tolerantes a esses compostos (Christoffoleti, 2016).

Os herbicidas inibidores da ACCase são categorizados em três grupos químicos principais: ariloxifenoxypropionatos (APPs), ciclohexanodionas (CHDs) e fenilpirazolininas (PPZ) (Tabela 1). Esses compostos foram introduzidos na agricultura há mais de três décadas, demonstrando eficácia consolidada no controle de gramíneas indesejadas. Sua aplicação pós-emergente permite um manejo eficiente das plantas daninhas, minimizando impactos adversos sobre as culturas dicotiledôneas, essenciais para a produção agrícola (Christoffoleti, 2016).

Tabela 1 - Grupos químicos, nomes comuns e nomes comerciais dos herbicidas inibidores da ACCase

Grupo químico	Nome comum	Nome comercial
Ariloxifenoxipropionatos (APPs) ("fops")	Cyhalofop-butyl	Clincher
	Clodinafop-propargyl	Topik
	Diclofop-methyl	Iloxan
	Fenoxyprop-p-ethyl	Podium EW, Response, Starice, Whip S
	Fluazifop-p-butyl	Fusilade
	Haloxyfop-p-metil	Gallant, Verdict
	Propaquizafop	Acert
	Quizalafop-p-ethyl	Targa
	Quizalafop-p-tefuril	Panther
Ciclohexanodionas (CHDs) ("dims")	Clethodim	Centurion, lord, Poquer, Select
	Profoxydim	Aura
	Sethoxydim	Poast, Poast Plus
	Tepraloxydim	Aramo

Fonte: adaptado de Oliveira Jr. (2011).

3 MECANISMO E MODO DE AÇÃO

Ácidos graxos são ácidos carboxílicos de longas cadeias alifáticas que desempenham funções fisiológicas como o armazenamento de energia, composição estrutural de membranas celulares e regulação hormonal nos organismos vivos. A acetil-CoA carboxilase (ACCase) é uma enzima que, na dependência de biotina, catalisa duas reações irreversíveis na via de síntese de ácidos graxos. Essa enzima possui três domínios funcionais: proteína carregadora de carboxil-biotina (BCCP ou BCC), biotina carboxilase (BC) e carboxil transferase (CT; duas subunidades). Os domínios BC e CT são os responsáveis pelas atividades catalíticas, que dependem de ATP, Mg²⁺ e HCO₃⁻, resultando na carboxilação de acetil-CoA para formação de malonil-CoA (Christoffoleti, 2016).

A malonil-CoA é necessária para a nova síntese de ácidos graxos que ocorre nos plastídeos, enquanto a malonil-CoA citosólica é utilizada na elongação dos ácidos graxos de cadeia muito longa (VLCFAs) e metabólitos secundários de plantas, como flavonoides e suberinas. Da mesma forma, existem isoformas plastídicas e citoplasmáticas de ACCases, sendo a primeira responsável por mais de 80% da atividade total dessas enzimas nas folhas (Christoffoleti, 2016).

A ACCase acelera a formação de malonil-CoA a partir de acetil-CoA e CO₂. Malonil-CoA e acetil-CoA são componentes dos fosfolipídeos e triacilgliceróis. Estes últimos se combinam para formar duplas camadas lipídicas que servem como membrana celular. A biossíntese de lipídeos ocorre, em sua maioria, nos meristemas das raízes e da parte aérea, onde novas células estão sendo formadas. A paralisação de sua produção interrompe a formação de novas membranas celulares e, dessa forma, nova formação celular. Se os lipídeos não são produzidos dentro da planta, não há produção das membranas celulares e o crescimento da planta é paralisado (Marchi *et al.*, 2008).

3.1 SINTOMATOLOGIA

Logo após a aplicação, o crescimento das plantas sensíveis cessa. Os primeiros sintomas do efeito herbicida em plantas sensíveis são notados inicialmente na região meristemática, onde a síntese de lipídeos para a formação de membranas é muito intensa. Em gramíneas, os meristemas (próximos aos entrenós) sofrem

descoloração, ficam marrons e desintegram-se. As folhas recém-formadas ficam cloróticas e morrem entre uma a três semanas após o tratamento (Figura 1). Folhas mais desenvolvidas, por sua vez, podem adquirir coloração arroxeadas ou avermelhada, assemelhando-se a sintomas de deficiência de fósforo (Figura 2) (Oliveira Jr., 2011).

Os sintomas de injúria causados por esses herbicidas não são evidentes até vários dias após o tratamento, embora as plantas cessem o crescimento logo após a aplicação. As folhas totalmente desenvolvidas de gramíneas tratadas podem parecer saudáveis por vários dias após o tratamento, mas novas folhas no verticilo da planta se soltam facilmente, expondo tecido em decomposição na base. As plantas, gradualmente, tornam-se púrpuras, marrons e morrem, mas as folhas velhas podem permanecer verdes por um longo tempo por já terem sua camada de cutícula formada (Marchi *et al.*, 2008).

Figura 1 - Sintomas de toxicidade de clethodim em pé-de-galinha quatro dias após aplicação de Select 240 EC



Fonte: Ramos (2023).

Figura 2 - Plântulas de milho com sintoma de injúria por Fusilade em cultivo de batata



Fonte: Marchi et al. (2008).

4 SELETIVIDADE

Quando se diz que um herbicida se caracteriza como seletivo a certa planta, depreende-se que há certa incapacidade no ingrediente ativo em controlar (provocar a morte) de certa planta, o que pode decorrer de mecanismos diversos, como metabolização das moléculas herbicidas, incapacidade de penetração na cutícula das plantas, superexpressão da enzima alvo, entre outros. Neste contexto, os mecanismos de ação e mais especificamente, os ingredientes ativos podem ser alocados nas categorias: não seletivos e seletivos. Dentro da classificação dos seletivos pode haver ainda as subclassificações de: seletividade genuína (biológica ou fisiológica), seletividade adquirida (que pode ocorrer por meio de transgenia) e seletividade topográfica (ou de posição) (Almeida; Ferrão, 2022).

Os herbicidas inibidores da síntese de lipídeos, classificados como inibidores da ACCase são então seletivos às plantas de folhas largas, já que as gramíneas são particularmente sensíveis à ação desses ingredientes ativos. Essa seletividade se deve ao fato de haver diferenças significativas entre monocotiledôneas e dicotiledôneas, na produção de proteínas (Marchi *et al.*, 2008).

Desse modo, ambas as plantas apresentam a ACCase no citoplasma das células e nos cloroplasto, entretanto, as plantas de folhas largas possuem uma forma procariótica nos cloroplastos, que é formada por subunidades, e uma forma eucariótica, composta por uma proteína, no citoplasma; já as plantas de folha estreita, apresentam apenas a ACCase eucariótica (tanto no citosol como nas organelas fotossintetizantes). Assim sendo, como os herbicidas conseguem de inibir apenas a isoforma eucariótica, afetando majoritariamente as gramíneas (Marchi *et al.*, 2008), em dicotiledôneas, a isoforma procariótica conseguirá suprir todo o malonil-CoA necessário à rota de síntese de lipídeos, tornando-as tolerantes (Vidal *et al.*, 2014).

Pode-se observar tal fenômeno ao analisar o trabalho de Dan (2009), que buscou identificar potencial seletividade do milheto — que é uma planta que vem sendo utilizada em cultivos de sucessão das culturas de safra, e em instalação de plantas de cobertura na entressafra — aos herbicidas mesotrione, tembotrione, atrazine, nicosulfuron, imazethapyr, haloxyfop-methyl e clethodim, aplicados na pós-emergência da cultura. Sob a ótica de que o milheto (*Penisetum glaucum*) é uma planta da classe monocotiledônea, e da família Poaceae, é de se esperar que os herbicidas pertencentes ao mecanismo de ação dos inibidores da ACCase não sejam

seletivos à cultura; o que de fato ocorreu. Na ocasião, o nicosulfuron, o imazethapyr, o haloxyfop-methyl e o clethodim acarretaram fitotoxicidade na cultivares de milheto utilizadas (Tabela 2).

Tabela 2 - Fitointoxicação apresentada por cultivares de milheto em função da aplicação de diferentes herbicidas em pós-emergência da cultura

Tratamentos ¹	Dose (g ha ⁻¹)	Fitointoxicação (%)			
		ADR 300	ADR 500	ADR 300	ADR 500
		7 DAA ²		21 DAA	
Atrazine	1000	6,5 Ea ³	5,2 Fa	0,0 Ea	0,0 Ea
Clatrhdodim	84	57,5 Ba	61,2 Ba	97,5 Aa	100 Aa
Haloxyfop- methyl	60	68,7 Aa	66,1 Aa	100 Aa	100 Aa
Imazethapyr	40	28,7 Ca	34,5 Cb	90,2 Ba	97,2 Bb
Mesotriione	120	32,5 Cb	25,0 Da	12,5 Da	15,5 Da
Nicosulfuron	80	20,0 Da	28,2 Db	83,2 Ca	91,5 Cb
Tembotriione	75,5	20,7 Da	21,5 Ea	3,2 Ea	1,1 Ra
Testemunha	-	0,0 Fa	0,0 Ga	0,0 Ea	
CV%		11,41		4,32	
Erro padrão		1,70		0,53	

¹ Em todos os tratamentos herbicidas, foi adicionado 0,5 L ha⁻¹ do adjuvante Aureo®

² DAA Dias após a aplicação dos herbicidas

³ Médias de tratamentos seguidas de mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott $p \leq 0,05$

Fonte: Dan (2009).

De forma oposta, Barroso (2010) evidencia em seu experimento a eficácia dos inibidores da ACCase no controle de gramíneas em lavouras de soja (que é uma planta da classe das dicotiledôneas). O objetivo foi avaliar a eficácia de herbicidas que inibem a ACCase, aplicados tanto de forma isolada quanto em combinação, no controle de várias espécies de plantas daninhas pertencentes à família das gramíneas, incluindo *Urochloa decumbens*, *Digitaria ciliaris*, *Eleusine indica*, *Urochloa plantaginea* e *Cenchrus echinatus*, em plantações de soja.

Os melhores resultados de controle para *U. decumbens* foram observados com o uso de haloxyfop-methyl. Tepraloxydime mostrou ser seletivo para *U. decumbens*.

Nenhum tratamento alcançou controle superior a 90% para *D. ciliaris*, mas sethoxydim e fluazifop-p-butyl mostraram eficácia reduzida. Apenas os tratamentos com sethoxydim e clethodim + fenoxyprop-p-ethyl não apresentaram controle satisfatório de *E. indica*. *U. plantaginea* foi a espécie mais facilmente controlada pelos herbicidas testados, destacando-se haloxyfop-methyl, tepraloxydim, clethodim e clethodim + fenoxyprop-p-ethyl. A adição de quizalofop-p-ethyl ao clethodim resultou em aumento significativo no controle de *C. echinatus*. Além disso, haloxyfop-methyl e tepraloxydim também mostraram controle satisfatório para essa espécie daninha (Barroso, 2010).

Tabela 3 - Produtividade de grãos da cultura da soja após a aplicação de diferentes tratamentos herbicidas

Tratamento	Dose (g i.a. ou e.a. ha⁻¹)	Produtividade de grãos (kg ha⁻¹)
Clethodim	84	2.388 a
Clethodim + quizalofop-p-ethyl	48 + 40	2.364 a
Clethodim + quizalofop-p-ethyl	50 +50	2.547 a
Sethoxydim	230	2.430 a
Tepraloxydim	100	2.205 a
Fluazifop-p-butyl	125	2.151 a
Haloxyfop-methyl	60	2.255 a
Testemunha sem herbicida	-	1.305 b
CV%	-	8,3

Fonte: Barroso (2010).

Os herbicidas inibidores da ACCase oferecem uma vantagem significativa de alta seletividade à cultura da soja (Tabela 3). Durante o experimento, não foram observados sinais de danos nas plantas de soja em nenhum dos tratamentos avaliados. Entre os princípios ativos testados, haloxyfop-methyl mostrou o espectro mais amplo de ação contra as gramíneas estudadas, sendo uma recomendação

segura especialmente em situações em que não há especialistas disponíveis para a identificação precisa das plantas daninhas gramíneas (Barroso, 2010).

5 RESISTÊNCIAS

A resistência de plantas invasoras a herbicidas refere-se à habilidade inata e passível de herança de certos biótipos dentro de uma população específica de plantas invasoras. Esses biótipos são capazes de sobreviver e de reproduzir-se mesmo após serem expostos a doses de herbicida que seriam letais para uma população comum (susceptível) da mesma espécie vegetal (Christoffoleti; López-Ovejero, 2003).

A resistência pode ser categorizada em simples, cruzada e múltipla. A resistência simples ocorre quando um biótipo se torna resistente a um único ingrediente ativo. A resistência cruzada acontece quando o biótipo é resistente a dois ou mais grupos químicos de um mesmo mecanismo de ação. Já a resistência múltipla ocorre quando o biótipo desenvolve resistência a dois ou mais mecanismos de ação distintos (Da Silva, 2023).

Em meio aos ingredientes ativos classificados como inibidores da enzima acetil CoA carboxilase, há 51 casos registrados mundialmente de plantas (monocotiledôneas) resistentes, dos quais, 10 casos são registrados no Brasil, com casos de resistências apresentadas de forma múltiplas e cruzadas em meio às ocorrências no País (Tabela 4) (HEAP, 2024).

Neste contexto, Christoffoleti, Kehdi e Cortez (2001), estudaram o manejo de populações resistentes aos graminicidas ariloxifenoxypropionatos e ciclohexanodionas, de capim-marmelada (*Urochloa plantaginea*), em sistema de plantio direto. Foram conduzidos dois experimentos para avaliar estratégias de manejo de plantas resistentes a herbicidas inibidores da ACCase. Um experimento comparou herbicidas com mecanismos de ação alternativos aos inibidores da ACCase, em condições de campo controladas para evitar a disseminação das plantas. Constatou-se que as plantas resistentes não demonstraram resistência cruzada com os herbicidas de manejo alternativos testados, sugerindo que produtos como glyphosate, paraquat, sulfosate, paraquat + diuron, MSMA e glufosinate podem ser eficazes para manejear populações de capim-marmelada resistentes durante a entressafra em áreas de plantio direto (Tabela 5).

Tabela 4 - Casos de resistência a herbicidas inibidores da ACCase no Brasil

Ano	Espécie	Ingredientes ativos	Culturas
1997	<i>Urochloa plantaginea</i>	haloxyfop-methyl, diclofop-methyl, fluazifop-butyl, propaquizafop, quizalofop-ethyl, fenoxyprop-ethyl, sethoxydim, butroxydim	Soja
2002	<i>Digitaria ciliaris</i>	haloxyfop-methyl, cyhalofop-butyl, fluazifop-butyl, propaquizafop, fenoxyprop-ethyl, sethoxydim	Soja
2003	<i>Eleusine indica</i>	cyhalofop-butyl, fenoxyprop-ethyl, sethoxydim	Soja
2010	<i>Lolium perene spp. multiflorum</i>	clethodim, glyphosate	Milho, soja, trigo
2010	<i>Avena fatua</i>	clodinafop-propargyl	Trigo
2015	<i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i>	cyhalofop-butyl, quinclorac (MOA in monocots), penoxsulam	Arroz
2016	<i>Digitaria insularis</i>	haloxyfop-methyl, fenoxyprop-ethyl	Soja
2016	<i>Lolium perene spp. multiflorum</i>	clethodim, iodosulfuron-methyl-Na	Trigo
2017	<i>Eleusine indica</i>	haloxyfop-methyl, fenoxyprop-ethyl, glyphosate	Milho, algodão, soja, feijão
2020	<i>Digitaria insularis</i>	haloxyfop-methyl, fenoxyprop-ethyl, glyphosate	Soja

Fonte: Heap (2024).

O segundo experimento foi realizado em casa de vegetação, usando plantas suscetíveis e resistentes. Foi testada a eficácia de herbicidas inibidores da ACCase com adição de aditivos nitrogenados (ureia e sulfato de amônio) e um tratamento sem aditivos. Constatou-se que os aditivos não influenciaram a eficácia dos herbicidas inibidores da ACCase em plantas provenientes de ambas as populações (suscetível e resistente). Esses estudos indicam estratégias potenciais para o manejo integrado de plantas daninhas resistentes a herbicidas, fornecendo opções viáveis para períodos entre safras e destacando a consistência da eficácia dos herbicidas inibidores da ACCase com aditivos nitrogenados (Christoffoleti; Kehdi; Cortez, 2001).

Tabela 5 - Porcentagem de controle do capim-marmelada aos 21 DAT, do experimento com herbicidas de manejo

Tratamentos	Dose em g (i.a. ha⁻¹)	Biótipos		Média dos tratamentos
		Suscetíveis	Resistentes	
Glyphosate	1.440	100 A	100 A	100
Paraquat	600	100 A	100 A	100
Amônio-glufosinate	600	99,1 A	98,7 A	98,9
Sulfosate	1.440	100 A	100 A	100
Paraquat + diuron	300 + 600	100 A	100 A	100
MSMA + diuron	980 + 2.520	76,7 A	76,7 A	76,7
Sethoxydim	230	94,1 A	1,9 B	44,6
Fluazifop-butil	250	89,4 A	0,6 B	37,5
Testemunha	-	89,4 A	0 B	0
Média dos biótipos		0 A	64,4 B	-

Fonte: Christoffoleti, Kehdi e Cortez (2001).

6 MISTURAS EM CALDA

A mistura de herbicidas em tanque na lavoura, apesar de ser uma prática antiga no Brasil, só foi regulamentada em 2018 pela Instrução Normativa Nº40. Essa técnica oferece vantagens como redução de custos, economia de tempo, mão de obra, água e óleo diesel. Além disso, proporciona maior agilidade nas operações, facilita o manejo da cultura, amplia o espectro de controle de ervas daninhas, retarda a evolução da resistência e minimiza a compactação do solo (Damo *et al.*, 2020).

A mistura ideal de herbicidas preconiza que eles atuem de forma independente, aumentando o espectro de controle das plantas daninhas com baixa toxicidade em relação à cultura de interesse. No entanto, quando dois ou mais herbicidas são combinados, o comportamento de um pode ser influenciado pela presença do outro, o que pode prejudicar a eficiência de controle ou aumentar a toxicidade devido a possíveis interações. As interações em calda de herbicidas e outros produtos fitossanitários podem então ser classificadas de três formas: aditivas (o efeito obtido é equivalente à soma dos efeitos isolados), sinérgicas (há um aumento da efetividade quando se compara ao efeito de cada um singularmente) e antagônicas (quando a soma dos efeitos resulta em queda da efetividade de controle em relação à utilização isolada dos ingredientes ativos) (Damo *et al.*, 2020).

No caso dos graminicidas abordados nesta revisão bibliográfica, um dos casos mais emblemáticos de antagonismo são: herbicidas inibidores da ACCase associados a inibidores de ALS, carfentrazone, metribuzin, dicamba, pyrithiobac-sodium e acifluorfen-sodium. Essas interações são frequentemente imprevisíveis, pois além da possibilidade de um herbicida alterar a atividade do outro, o comportamento da mistura pode ser influenciado por características da água, como pH, minerais suspensos e dureza. A eficácia da mistura também pode variar conforme a espécie de planta-alvo, o estágio de desenvolvimento da planta e as condições ambientais (Damo *et al.*, 2020).

Assim, devem ser realizadas aplicações estratégicas de mecanismos que possam vir a apresentar incompatibilidade (seja fisiológica, química, bioquímica ou competitiva). Essa estratégia foi abordada por Santana (2023) em seu trabalho de conclusão de curso, em que foram analisadas aplicações sequenciais e associações de herbicidas latifolicidas e inibidores da ACCase em dessecação pré-semeadura de *Conyza spp.* e *Digitaria insularis*.

O estudo avaliou diferentes métodos de controle para áreas infestadas por *Conyza* spp. e *Digitaria insularis* no estádio fenológico avançado. O experimento utilizou 13 tratamentos, incluindo combinações de herbicidas como 2,4-D, dicamba, triclopir, atrazina, mesotriione, diclosulam e haloxifope-p-metílico. Os resultados indicaram que os herbicidas auxínicos (2,4-D, dicamba, triclopir) afetaram a eficácia do haloxifope-p-metílico contra *Digitaria insularis*, enquanto a combinação diclosulam + halauxifen-methyl não afetou negativamente o controle desta espécie. Para *Conyza* spp., os tratamentos com fluroxipir/cletodim e glifosato + 2,4-D foram menos eficazes, sendo preferíveis combinações que alcançaram controle superior a 80% aos 35 DAT. Assim, para áreas com infestação mista de folhas largas e gramíneas, recomenda-se o uso de diclosulam + halauxifen-methyl associado ao haloxifope-p-metílico, além de opções sequenciais com atrazina/mesotriione e herbicidas iniciais (Santana, 2023).

Pensando no caso de interações sinérgicas e aditivas dos inibidores da ACCase, Barros *et al.* (2014) analisaram a taxa de controle de capim-amargoso, em formulações de calda com associação ao glifosato. O estudo aplicou diferentes misturas de quatro graminicidas e três formulações de glyphosate em duas fases de crescimento do capim-amargoso resistente ao herbicida. O controle químico foi avaliado por notas visuais aos 7, 14 e 28 dias após a aplicação, além da biomassa fresca das plantas aos 28 dias. Os resultados indicaram que todas as combinações foram eficazes no manejo da resistência de *Digitaria insularis*, exceto o uso isolado de glyphosate, sendo crucial aplicar o controle em estágios iniciais de desenvolvimento da planta. Para estágios mais avançados, a melhor eficácia foi obtida com a associação de quizalofop às formulações sal de amônio e sal potássico de glyphosate, sugerindo a necessidade de outras medidas complementares de controle (Tabela 6).

Tabela 6 - Médias de controle visual de amargoso aos 7, 14 e 28 dias após a aplicação (DAA) e porcentagem de redução de biomassa fresca em relação à testemunha, aos 28 DAA

Tratamento	Controle Visual (%)			Redução Biomassa Fresca (%)
	7 DAA	14 DAA	28 DAA	
Glyphosate ^{1/}	31,3 bcde	46,3 e	47,7 d	63,7 abc
Glyphosate + Quizalofop	46,3 ab	70,0 abc	78,8 c	78,9 a
Glyphosate + Haloxyfop	27,5 de	63,8 bcd	76,3 c	69,0 abc
Glyphosate + Sethoxydim	40,0 abed	75,0 abc	80,0 bc	71,0 abc
Glyphosate + Clethodim	47,5 a	78,8 ab	81,3 abc	68,1 abc
Glyphosate ^{2/}	30,0 cde	50,0 de	35,0 e	65,1 abc
Glyphosate + Quizalofop	38,8 abcd	81,3 a	91,3 ab	73,2 abc
Glyphosate + Haloxyfop	38,8 abcd	77,5 ab	80,0 bc	74,1 abc
Glyphosate + Sethoxydim	40,0 abcd	72,5 abc	78,8 c	69,6 abc
Glyphosate + Clethodim	43,8 abc	65,0 bcd	82,5 abc	66,4 abc
Glyphosate ^{3/}	40,0 abcd	61,3 cde	68,8 cd	56,4 c
Glyphosate + Quizalofop	41,3 abcd	76,3 abc	91,0 a	72,0 abc
Glyphosate + Haloxyfop	31,3 bcde	61,3 cde	76,3 c	64,6 abc
Glyphosate + Sethoxydim	36,3 abcde	68,8 abc	77,5 c	71,1 abc
Glyphosate + Clethodim	30,0 cde	68,8 abc	76,3 c	62,7 abc
Quizalofop	28,8 cde	68,8 abc	82,5 abc	76,4 ab
Haloxyfop	27,5 de	61,3 cde	78,8 c	79,6 a
Sethoxydim	30,0 cde	67,5 abc	75,0 c	63,1 abc
Clethodim	22,5 e	61,3 de	68,8 cd	60,5 bc
DMS ^{4/}	15,31	15,62	13,51	18,04
F	22,21 **	9,37 **	57,49 **	3,24 *
CV ^{5/}	9,76	8,94	6,71	7,79

^{1/} Sal de isopropilamina; ^{2/} sal de amônio; ^{3/} sal potássico; ^{4/} diferença mínima significativa; ^{5/} coeficiente de variação; adição de óleo mineral segundo recomendação do fabricante em todos os tratamentos. *, ** Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey em nível de probabilidade de erro de 5%.

Fonte: Barroso (2014).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, os herbicidas inibidores da ACCase desempenham um papel crucial na agricultura moderna, oferecendo uma ferramenta eficaz para o controle de gramíneas daninhas em culturas diversas. A sua especificidade de ação, direcionada principalmente às plantas monocotiledôneas, torna-os valiosos para a proteção das culturas de interesse. No entanto, a questão da resistência de plantas daninhas a esses herbicidas é um desafio contínuo e crescente. A evolução rápida de biótipos resistentes em diversas regiões agrícolas do mundo destaca a necessidade urgente de estratégias integradas de manejo de resistência.

Para enfrentar essa questão, é fundamental adotar abordagens que combinem o uso racional desses herbicidas com práticas agrícolas sustentáveis e diversificadas. Isso inclui a rotação de modos de ação, o uso de misturas de herbicidas com diferentes mecanismos de ação e a implementação de técnicas de manejo integrado de plantas daninhas. Além disso, investimentos contínuos em pesquisa para desenvolver novas tecnologias e produtos que minimizem o impacto ambiental e reduzam a pressão seletiva sobre as plantas daninhas são cruciais.

Por fim, a educação e a conscientização dos agricultores sobre a importância do manejo adequado de herbicidas são essenciais para promover práticas sustentáveis e preservar a eficácia dos inibidores da ACCase a longo prazo. A colaboração entre produtores, pesquisadores, indústria e governos é igualmente vital para enfrentar os desafios da resistência de plantas daninhas de forma eficaz e garantir a segurança alimentar global. Ao implementar estratégias integradas e sustentáveis, podemos assegurar que os herbicidas inibidores da ACCase continuem a ser uma ferramenta valiosa e eficaz para a agricultura moderna, protegendo as culturas e promovendo uma produção agrícola responsável e sustentável.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Edmilson Igor Bernardo; FERRÃO, Gregori da Encarnação. **FUNDAMENTOS EM BIOLOGIA E MANEJO DE PLANTAS DANINHAS.** São Luís: Edufma, 2022.

BARROSO, A. L. L. et al. Eficácia de herbicidas inibidores da ACCase no controle de gramíneas em lavouras de soja. **Planta Daninha**, v. 28, p. 149-157, 2010.

BARROSO, A. A. M. et al. Interação entre herbicidas inibidores da ACCase e diferentes formulações de glyphosate no controle de capim-amargoso. **Planta Daninha**, v. 32, p. 619-627, 2014.

CHRISTOFFOLETI, P. J.; KEHDI, C. A.; CORTEZ, M. G. Manejo da planta daninha Brachiaria plantaginea resistente aos herbicidas inibidores da ACCase. **Planta daninha**, v. 19, p. 61-66, 2001.

CHRISTOFFOLETI, P. J.; LÓPEZ-OVEJERO, R. Principais aspectos da resistência de plantas daninhas ao herbicida glyphosate. **Planta daninha**, v. 21, p. 507-515, 2003.

DAMO, L. et al. **Misturas de herbicidas em tanque: o que saber?** 8. ed. Viçosa: Mipd, 2020. 14 p.

DAN, H. A. et al. Seletividade de associações herbicidas pós-emergentes em variedade de soja precoce. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 7, n. 2, p. 36-42, 2008.

DAN, H. DE A. et al. Seletividade de herbicidas aplicados na pós-emergência da cultura do milheto (*Pennisetum glaucum*). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, n. 03, 2009.

DA SILVA, Alexandre Ferreira et al. **Dispersão de plantas daninhas resistentes a glifosato no Brasil: recomendações de manejo.** 2023.

HEAP, I. **An International Database for Pesticide Risk Assessments and Management.** s.l.: Herbicide Resistance Action Committee, 2024. Disponível em: <https://www.weedscience.org/Pages/filter.aspx>. Acesso em: 06 jul. 2024.

LÓPEZ-OVEJERO, R. F. et al. Alternativas de manejo químico da planta daninha *Digitaria ciliaris* resistente aos herbicidas inibidores da ACCase na cultura de soja. **Planta Daninha**, v. 24, p. 407-414, 2006.

MARCHI, G. et al. **Herbicidas: mecanismo de ação e uso.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. 36 p.

OLIVEIRA JR., R.S. et al. **Biologia e manejo de plantas daninhas.** Curitiba: Omnipax, 2011.

SANTANA, L. O. M. **APLICAÇÕES SEQUENCIAIS OU ASSOCIAÇÕES? QUAL A MELHOR ESCOLHA PARA OS HERBICIDAS INIBidores DA ACCASE E LATIFOLICIDAS EM DESSECAÇÃO PRÉ-SEMEADURA DE CONYZA spp (L.) CONQUIST E DIGITARIA INSULARIS (L.) FEDDE.** 2023. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agronômica, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2023.

VIDAL, R. A. et al. Mecanismos de ação dos herbicidas. **Aspectos da biologia e manejo das plantas daninhas**, v. 10, p. 235-256, 2014.