



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
CURSO DE AGRONOMIA

**O PANORAMA DO USO DE PLANTAS TRANSGÊNICAS
TOLERANTES A HERBICIDAS NO BRASIL**

CHRISTIAN JHALELE FUMUPAMBA

MONOGRAFIA

BRASÍLIA-DF
Dezembro/2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINARIA
CURSO DE AGRONOMIA

Christian Jhalele Fumupamba

O PANORAMA DO USO DE PLANTAS TRANSGÊNICAS
TOLERANTES A HERBICIDAS NO BRASIL.

Monografia apresentada à
Faculdade de Agronomia e Medicina
Veterinária da Universidade de
Brasília, como parte das exigências do
curso de Graduação em Agronomia,
para a obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo

ORIENTADOR:

Prof. Dr. NICOLAU BRITO DA CUNHA

Brasília-DF

Dezembro/2023

FICHA CATALOGRÁFICA

JF978p Jhalele Fumupamba, Christian
O panorama do uso de plantas transgênicas tolerantes a herbicidas no Brasil. / Christian Jhalele Fumupamba; orientador Nicolau Brito da Cunha. -- Brasília, 2023.
30 p.

Monografia (Graduação - Agronomia) -- Universidade de Brasília, 2023.

1. Manejo de plantas daninhas. 2. controle químico. 3. herbicidas. 4. biotecnologia. 5. plantas tolerantes à herbicidas. I. Brito da Cunha, Nicolau, orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FUMUPAMBA, J.C. O panorama do uso de plantas transgênicas tolerantes a herbicidas no Brasil. Monografia (Graduação - Agronomia), Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, DF, 30f, 2023.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: CHRISTIAN JHALELE FUMUPAMBA

Título da Monografia de Conclusão de Curso: O panorama do uso de plantas transgênicas tolerantes a herbicidas no Brasil.

Grau: 3º Ano: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação, e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

O PANORAMA DE USO DE PLANTAS TRANSGÊNICAS TOLERANTES A
HERBICIDAS NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovado em: 18 de Dezembro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. NICOLAU BRITO DA CUNHA

FAV/Universidade de Brasília

Orientador

Prof. Dr. MARCELO FAGIOLI

FAV/Universidade de Brasília

Membro Interno

Eng. Agr. MARJORIE STEMLER DA VEIGA

CREA-DF

Membro Externa

“Dedico este trabalho primeiramente a meu Deus Jeová por ter me dado forças, a minha mãe por ter me apoiado em todos os momentos da minha vida e a minha noiva Sandrelisa Martin Monteiro por ter me incentivado a ingressar no curso.”

AGRADECIMENTOS

À Deus Jeová por ter me dado forças para superar as dificuldades.

À minha família, principalmente a minha mãe, minha noiva, minha sogra por sempre me incentivarem a estudar.

Ao orientador prof. Dr. NICOLAU BRITO CUNHA por ter aceitado a orientação e ajudar na confecção do trabalho.

À banca avaliadora.

Aos meus amigos de curso, Evelin Lorrane, Yvanna Maia, Nathalia Ramos, por terem me acompanhado em toda essa trajetória e também ao Jonathas Eduardo Miranda Gomes, Júlio Barreto, Pedro Henrique pelos conselhos e pela amizade.

Aos meus amigos de longa data, pelo companheirismo e por sempre estarem na minha vida.

À Universidade de Brasília pela oportunidade de cursar a graduação em Agronomia.

1. RESUMO

As plantas daninhas representam diversos riscos para a agricultura no Brasil. Elas afetam negativamente o rendimento e a produtividade das culturas, causando impactos diretos no desenvolvimento das culturas. O método de controle de plantas daninhas mais amplamente utilizado é o químico, por meio de herbicidas capazes de contribuir para a obtenção de elevadas produtividades agrícolas, mas também com riscos para a saúde humana e para o meio-ambiente, quando mal manejados. O uso incorreto de herbicidas no manejo de daninhas também pode contribuir para o aumento na pressão de seleção de biótipos de daninhas tolerantes ou resistentes aos herbicidas. Este trabalho tem como objetivo apresentar o panorama geral de uso de plantas transgênicas tolerantes a herbicidas no Brasil. A engenharia genética de plantas tem desempenhado um papel fundamental no melhoramento de culturas por meio da introdução de transgene de interesse que conferem tolerância a um ou mais herbicidas. Esses novos fenótipos facilitam o manejo e apresentam potencial para a redução do custo final de produção de produtos agrícolas.

Palavras-chaves : **Manejo de plantas daninhas, controle químico, herbicidas, biotecnologia, plantas transgênicas tolerância à herbicidas.**

Sumário

Sumário

1. RESUMO	7
2. INTRODUÇÃO	9
3. OBJETIVO	11
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4.1 Plantas daninhas : características principais e manejo	12
Controle químico	16
4.2 PROBLEMA DE RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS NO BRASIL 18	
4.3 PLANTAS TRANSGÊNICAS DE SEGUNDA GERAÇÃO	22
4.4 HERBICIDAS MAIS UTILIZADOS EM PLANTAS TH NO BRASIL E SEUS MECANISMOS DE AÇÃO	23
4.5 PLANTAS TH NO BRASIL	25
4.6 ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE CUSTO DE PRODUÇÃO DE HERBICIDAS APÓS A ADOÇÃO DE LAVOURAS TH NO BRASIL	32
4.7 DESAFIOS DA TECNOLOGIA TH NO BRASIL	33
4.8 NOVAS TECNOLOGIAS EMERGENTES: EDIÇÃO DE GENOMA E PLANTAS COM “STACKED TRAITS”	34
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
6. REFERÊNCIAS	37

2. INTRODUÇÃO

A agricultura tem sido uma atividade fundamental para a subsistência humana ao longo da história. Com o crescimento da população mundial, a demanda por alimentos aumentou significativamente, o que levou ao desenvolvimento de diversas técnicas e tecnologias agrícolas. Uma dessas tecnologias é a modificação genética de plantas, que tem sido amplamente utilizada para melhorar características agrônômicas importantes, como a tolerância a herbicidas (CARVALHO et al., 2022).

As plantas daninhas representam uma ameaça significativa à produtividade agrícola, competindo com as culturas desejadas por nutrientes, água e luz solar. O uso de herbicidas é uma prática comum para o controle dessas plantas indesejadas. No entanto, a aplicação indiscriminada de herbicidas pode causar impactos ambientais negativos e levar ao desenvolvimento de resistência por parte das plantas daninhas. Portanto, a busca por alternativas mais eficientes e sustentáveis de manejo e controle de daninhas é essencial (CAMPOS et al., 2023).

Neste contexto, plantas transgênicas tolerantes a herbicidas (TH) foram desenvolvidas por empresas públicas, como a Embrapa, e privadas, como a Monsanto, para facilitar o manejo de plantas daninhas, introduzir seletividade genética ao genótipo de culturas importantes contra herbicidas comumente utilizados para o controle de daninhas, aumentando as possibilidades de integração entre práticas de manejo e reduzindo a intensidade do controle químico (CHRISTOFFOLETI; LÓPEZ-OVEJERO, 2003).

A primeira planta transgênica obtida como prova de conceito foi tabaco tolerante a dois antibióticos (Canamicina e cloranfenicol) (HERRERA-ESTRELLA et al.,

1983). Em 1996, a soja RoundUp READY (RR), tolerante ao herbicida glifosato entrou no mercado dos EUA, e em 2001, cerca de 70% da safra de soja do país era do tipo TH (BANERJE et al.,2023).

A primeira planta geneticamente modificada que chegou ao Brasil foi a soja RR, contrabandeada por agricultores gaúchos e trazida da Argentina para o Rio Grande do Sul. somente em 1998 depois da aprovação da primeira soja comercial, Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio) liberou a comercialização e o plantio da soja RR no Brasil, mas não houve o plantio imediato no campo, porque houve um atraso causado por o Instituto de Defesa do Consumidor (IDEC), entrou com uma liminar na justiça pedindo para suspender a decisão judicial que autorizou o cultivo da soja transgênica. E isso valeu por um certo período, voltando a ser liberado para a comercialização e o plantio da soja RR no Brasil em 2003 , (BECKIE, 2011).

Desde então, as culturas do milho, do algodão e da cana-de-açúcar se juntaram à soja como as culturas transgênicas TH cultivadas no Brasil, com forte expansão da área cultivada e aumento de produtividade sem precedentes (BECKIE, 2011).

O contexto da agricultura moderna

A agricultura e os produtores rurais estão em constante processo de aperfeiçoamento técnico, com ênfase no aumento da produtividade das lavouras e no uso de sementes e mudas geneticamente melhoradas e implementos e maquinários cada vez mais modernos, que facilitam a vida no campo (BROOKES, 2014).

A conexão entre agricultores, pesquisadores e indústria foi fundamental para o desenvolvimento de ferramentas e estratégias que aumentassem a produtividade de forma sustentável. É verdade que nos anos seguintes à Revolução Industrial houve uma rápida expansão da atividade agrícola global, mas tal boom foi necessário para acompanhar o crescimento e desenvolvimento da população mundial (DUKE, 2015).

Como exemplo, a produção *per capita global* de cereais aumentou de 0,29 para 0,39 toneladas entre 1961 e 2014 devido ao aumento da produtividade agrícola. O aumento da produtividade agrícola tem sido possibilitado por uma série de avanços tecnológicos que vão desde a obtenção de insumos mais eficientes, até diferentes estratégias de manejo das culturas (DUKE, 2015).

Uma das maiores inovações na agricultura moderna veio com os avanços na biotecnologia vegetal. Cultivares com características desejáveis como aumento de

rendimento e resistência a pragas e doenças foram desenvolvidas com base nesse conhecimento. Como resultado, milho, trigo e arroz geneticamente melhorados foram adotados em todo o mundo nas décadas de 1950 e 1960. Em 2000, mais de 8.000 variedades melhoradas foram desenvolvidas para 11 das principais plantas cultivadas no mundo (GREEN, 2014).

A introdução dessas plantas melhoradas aumentou a produção em 21% em todos os países em desenvolvimento entre 1961 e 1980. Entre 1981 e 2000, o crescimento da produção foi de até 50% (BROOKES, 2014). Nos últimos anos, a biotecnologia acelerou o melhoramento genético de plantas e permitiu o desenvolvimento de culturas a partir da introdução e expressão de transgenes nos genomas vegetais, aumentando não apenas fatores fisiológicos relacionados à produtividade, mas também a tolerância a estresses abióticos (seca, salinidade e inundação) e bióticos (pragas e patógenos). Além disso, com a precisão da biotecnologia moderna é possível desenvolver plantas geneticamente editadas, com a integração/recombinação do transgene em “loci” genômicos de alto nível de expressão e plantas com múltiplos transgenes, cada um codificador de um fenótipo (“traços empilhados” – “*stacked traits*”), ferramentas poderosas para ampliar as possibilidades de manejo de daninhas (DUKE, 2015).

As plantas transgênicas representam uma das ferramentas mais rapidamente adotadas na agricultura global, nos últimos 20 anos. O desenvolvimento de plantas transgênicas representou uma grande revolução no melhoramento genético de plantas, pois possibilitou a expressão de características encontradas em outras espécies, agregando vantagens não disponíveis no banco de acessos da cultura (germoplasma). Com ela, foi possível superar a principal limitação do melhoramento convencional, em que a compatibilidade sexual entre as espécies é pré-requisito para a transmissão de caracteres, além de o melhorista passar a intervir no genoma das plantas de forma mais controlada (GREEN, 2014).

3. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o panorama geral de uso de plantas transgênicas tolerantes a herbicidas no Brasil.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Plantas daninhas : características principais e manejo

Um dos fatores mais importantes que afetam o rendimento das culturas e a produtividade agrícola é a presença de plantas daninhas no campo, também chamadas de plantas infestantes. As plantas daninhas incluem todas as plantas que inibem o crescimento das culturas, exibem persistência, afetam negativamente as atividades humanas e são consideradas plantas indesejáveis. Elas geralmente crescem em condições adversas, como ambientes secos ou úmidos, temperaturas baixas ou altas e diferentes solos. As daninhas também são capazes de produzir abundantes sementes viáveis através de uma variedade de métodos de propagação e frequentemente são resistentes a pragas e doenças (ALRIDIWIRSAH et al., 2022).

As plantas daninhas são de grande importância econômica por causarem prejuízos para a cultura principal, como interferência competição, além de efeitos indiretos como aumento dos custos de produção, dificuldades de colheita e redução do valor/qualidade do produto, além de dificultar o manejo de pragas e doenças (BALBINOT, JR. et al., 2002).

As perdas causadas por plantas daninhas podem aumentar em mais de 90% se o controle não for implementado, neste caso essas perdas são em média 13-15% na produção de grãos (Figura 1).

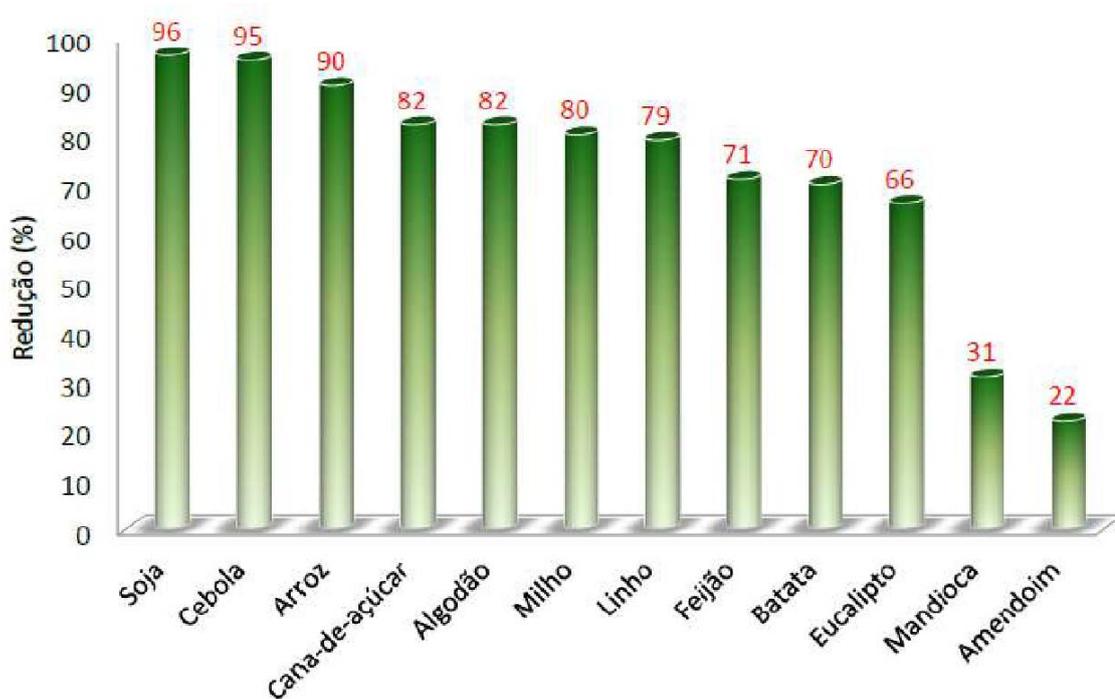


Figura 1: Estimativas de perdas agrícolas causadas pela ausência de manejo de plantas daninhas sobre as principais culturas brasileiras. Adaptado de Carvalho et al. (2022).

Das 350.000 espécies de plantas conhecidas cerca de 7.000 são plantas daninhas verdadeiras. Desse total, 250 são realmente importantes e 75% delas são responsáveis por 90% das perdas agrícolas atribuídas às plantas daninhas. As principais espécies de daninhas que ocorrem nas lavouras brasileiras, abrange tanto plantas monocotiledôneas, como capim-marmelada (*Urochloa plantaginea*); capim-braquiária (*Urochloa decumbens*); timbete (*Cenchrus echinatus*); milhã (*Digitaria* spp.); capim-amargoso (*Digitaria insularis*) e capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*). Quanto as dicotiledôneas, temos a apaga-fogo (*Alternanthera tenella*); caruru (*Amaranthus* spp.); balãozinho (*Cardiospermum halicacabum*); picão-preto (*Bidens pilosa*); trapoeraba (*Commelina* spp.); buva (*Conyza* spp.); leiteira ou leiteiro (*Euphorbia heterophylla*); corda-de-viola (*Ipomoea* spp.); nabiça (*Raphanus raphanistrum*); poaia-branca (*Richardia brasiliensis*); guanxuma (*Sida* spp.); e erva-quente (*Spermacoce latifolia*), Capim Colonião (*Panicum maximum*), Grama seda (*Cynodon dactylon*) dentre outras (CAMPOS et al., 2023) (Figura 2).



Figura 2: Buva (*Conyza* spp.) em campo de soja sob sistema plantio direto (SPD). Adaptado de (CARVALHO, 2021).

A ampla maioria das espécies de daninhas que afetam as culturas brasileiras são de ciclo anual. Ao contrário das daninhas perenes (cujo ciclo de desenvolvimento é mais lento e pode durar mais de um ano), as daninhas anuais completam o seu ciclo reprodutivo em até um ano, potencializando a produção maciça de sementes com alta variabilidade genética e potencial de adaptação às condições edafoclimáticas (CARVALHO et al., 2022).

Graças à sua competitividade, as plantas daninhas garantem sua persistência por meio da dormência com a germinação desigual ao longo tempo das sementes. Essas habilidades dificultam o controle das espécies invasoras, pois nem todas germinam ao mesmo tempo, mesmo em condições ideais de temperatura, umidade e luz (CHRISTOFFOLETI AND LÓPEZ-OVEJERO, 2003).

A produção de sementes de daninhas é alta, ao final da reprodução sexual, e essas sementes tendem a ser pequenas e pouco densas, para facilitar a sua dispersão pelo vento

(anemocoria) a grandes distâncias (chuva de sementes). Além disso, muitas espécies apresentam também a reprodução assexuada, por bulbos, bulbilhos, tubérculos, rizomas e estolões. Estas estruturas apresentam gemas e células meristemáticas e totipotentes, capazes de se multiplicar e diferenciar mediante estímulos físicos e químicos, com potencial de regeneração de plantas daninhas adultas e fisiologicamente aptas a reiniciar o ciclo reprodutivo, contribuindo decisivamente para o aumento da infestação. As sementes e as estruturas de propagação vegetativa de daninhas são denominadas propágulos (CARVALHO et al., 2022).

O conjunto de propágulos de daninhas no solo é denominado banco de sementes. Estas estruturas podem ser encontradas em diferentes profundidades ao longo do perfil do solo, com ou sem dormência. Sementes e estruturas de propagação vegetativa mais superficiais no banco de sementes tendem a germinar mais cedo e necessitam ser controladas rapidamente. O revolvimento do solo pode induzir a germinação de propágulos que estavam mais profundamente enterrados no solo. Pela sua importância, o banco de sementes é um dos alvos preferenciais de manejo de daninhas (COSTA et al., 2014).

O grau de perturbação das plantas daninhas nas lavouras é determinado pelas espécies presentes na área, pela distribuição regional das plantas daninhas e pelos períodos de convivência das plantas daninhas com as lavouras. A redução dos períodos de convivência é atribuição do Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD). Segundo o MIPD, a adoção de dois ou mais métodos de controle de daninhas pode diminuir o período crítico livre de daninhas no campo (PCLD), além de reduzir a pressão de seleção de plantas tolerantes a herbicidas usados no controle químico. Para a correta implantação do MIPD, é importante e necessário identificar corretamente as espécies presentes na área e sua frequência (CARVALHO et al., 2022).

Os quatro principais objetivos do MIPD são:

- 1) Reduzir a população de daninhas no campo,
- 2) Controlar e reduzir o banco de sementes,
- 3) Diminuir a intensidade do controle químico de daninhas com herbicidas (diminuindo riscos para a saúde humana e para o meio-ambiente e diminuindo custos de produção).

4) Minimizar a pressão de seleção de plantas daninhas mutantes tolerantes/resistentes a herbicidas (COSTA et al., 2014).

Os principais métodos de controle de daninhas são:

- a) Controle preventivo: é o conjunto de medidas utilizadas para evitar ou minimizar a entrada e o estabelecimento de daninhas numa região. Envolve o uso de sementes e mudas certificadas livres de daninhas.
- b) Controle cultural: Envolve práticas agrícolas que visam reduzir a infestação de plantas daninhas, como rotação de culturas, cultivo de cobertura, manejo adequado da irrigação e adubação equilibrada.
- c) Controle mecânico: Utilização de métodos físicos para remover ou destruir as plantas daninhas, como capina manual, roçagem, uso de ferramentas agrícolas, controle térmico (por exemplo, com uso de vapor ou chamas) e uso de coberturas protetoras.
- d) Controle biológico: Uso de agentes biológicos, como insetos, fungos ou organismos herbívoros específicos, para reduzir as populações de plantas daninhas.
- e) Controle químico: Utilização de herbicidas para controlar as plantas daninhas. Os herbicidas podem ser seletivos, capazes de causar prejuízos metabólicos e fisiológicos apenas para as plantas monocotiledôneas (de folha estreita) ou dicotiledôneas (de folha larga), ou não seletivos, afetando tanto as plantas de folha larga ou estreita (CARVALHO et al., 2022).

Controle químico

Os herbicidas podem ser aplicados antes ou depois da semeadura ou do plantio de mudas. Quando usados em pré-semeadura ou pré-plantio, os herbicidas têm a finalidade de promover a dessecação das plantas daninhas em áreas de plantio direto ou na destruição de propágulos de daninhas no banco de sementes para a semeadura/plantio “no limpo”, com ausência de propágulos viáveis nas camadas superficiais do solo (D’AMICO-DAMILÃO et al., 2020).

A aplicação em pré-plantio incorporado é realizada no caso dos herbicidas que precisam ser posicionados a certa profundidade por falta de movimentação no solo ou

para evitar volatilização (transformação em gases) e fotodecomposição (degradação pela luz) (CAMPOS et al., 2023).

Quando os herbicidas são aplicados após a semeadura ou plantio de mudas eles podem ser de Pré ou Pós-emergência de daninhas e plantas cultivadas. A aplicação em pré-emergência é feita quando os herbicidas têm ação apenas sobre as plântulas e plantas em fase inicial de crescimento, após a emergência da semente ou da estrutura de propagação vegetativa. O herbicida de pós emergência têm ação de contato, quando atua próximo ao local de absorção pelas folhas ou pelas raízes, ou sistêmica, quando ele transloca via vasos do xilema, do floema ou por ambos, por outras partes da planta, distantes do sítio inicial de contato e absorção (COSTA et al., 2014).

O método químico de controle de daninhas apresenta vantagens e desvantagens, dentre as quais:

Vantagens

- Herbicidas de ação rápida e eficaz no controle de muitas espécies - amplo espectro de ação;
- Controle de plantas daninhas na linha da cultura e no solo;
- Controle de plantas daninhas perenes e persistentes;
- Permite aplicações em diversos estágios fenológicos da cultura;
- Há produtos seletivos às plantas cultivadas, facilitando o manejo de daninhas;

Desvantagens:

- Alguns herbicidas apresentam toxicidade alta para humanos e para outros animais;
- Riscos para o meio-ambiente, incluindo o solo, a água e a atmosfera;
- Efeitos residuais persistentes no ambiente;
- O mau manejo pode causar aumento na pressão de seleção de espécies tolerantes/resistentes a herbicidas;
- Necessidade de especialização na aplicação;
- Aumento nos custos de produção das culturas (MAJRASHI, 2022),

A principais limitações do uso de controle químico dizem respeito aos riscos à saúde humana e ao meio ambiente e aos altos custos de aquisição, manipulação e aplicação de herbicidas.

Dentre os defensivos utilizados para a condução das principais lavouras no Brasil, os herbicidas são os que apresentam os maiores custos associados à sua produção, aquisição e manejo (Figura 3).

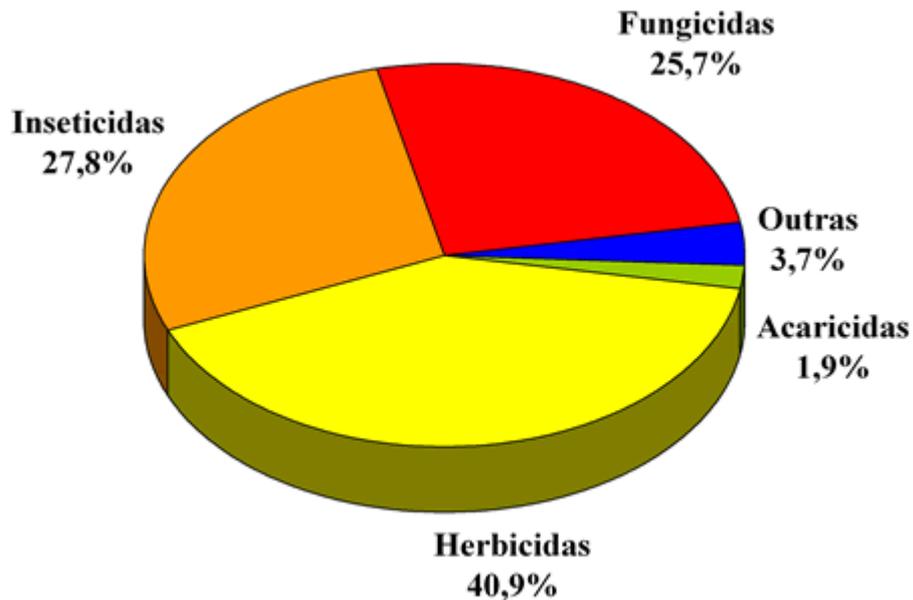


Figura 3: Participação das classes no valor das vendas de defensivos agrícolas, no Brasil, 2020. (Instituto de Economia Agrícola , 2019)

De acordo com estudos da Embrapa que avaliaram as principais regiões produtoras do país, os custos de produção com lavouras de soja infestadas por plantas daninhas resistentes ao glifosato podem subir de 42% a 222%, principalmente pelo aumento de gastos com herbicidas e pela perda de produtividade do grão. Em plantas infestadas pela Buva (*Conyza* spp.), os valores sobem em média 42%. No caso do capim amargoso (*D. insularis*), os custos podem aumentar até 165%. (MAJRASHI, 2022)

4.2 PROBLEMA DE RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS NO BRASIL

O mau manejo de plantas daninhas no Brasil tem levado a um aumento na verificação dos casos de plantas daninhas biótipos resistentes a herbicidas. O mau manejo costuma ser caracterizado por uma combinação dos seguintes fatores:

1. Escolha errada da cultivar para as condições edafoclimáticas locais e de cultivares pouco competitivas contra as daninhas;

2. Mau manejo de pragas e patógenos;
3. Mau manejo da irrigação;
4. A não-realização da rotação de culturas;
5. A não-realização de períodos de pousio;
6. A não-realização de rotação de diferentes herbicidas com diferentes mecanismos de princípios ativos;
7. A aplicação repetitiva de herbicidas em subdosagens e/ou em superdosagens;
8. Não respeitar o intervalo de pulverizações recomendado para a cultura;
9. Não respeitar o período de carência após a última pulverização;
10. O desconhecimento do histórico de infestação da área com daninhas;
11. A incapacidade de identificar as daninhas no campo;
12. A escolha de herbicidas não recomendados para a cultura (MARTINS, MARTINS, and SILVA JR. 2019).

A tolerância e a resistência de plantas daninhas a herbicidas são fenômenos genéticos, causados por mutações espontâneas ou induzidas, além de recombinação. A resistência é caracterizada pela capacidade de um biótipo vegetal sobreviver e prosperar após a aplicação de um herbicida em uma dose comercial recomendada (que normalmente combateria uma população dessa espécie de planta), sem apresentar sintomas ou com sintomas muito brandos, que não comprometem o seu crescimento/desenvolvimento (MARCHI et al., 2022).

A tolerância, por outro lado, é a capacidade de algumas plantas em suportar as doses recomendadas de herbicida, apresentando sintomas moderados a graves de citotoxicidade, com prejuízos para o seu crescimento e/ou desenvolvimento (D'AMICO-DAMILÃO et al. 2020).

A pressão de seleção é a capacidade que agentes externos, como herbicidas, apresentam de remover/destruir plantas susceptíveis da área de cultivo, que competiriam com as plantas tolerantes ou resistentes por luz, espaço, água e nutrientes. Sem os competidores, as plantas selecionadas encontram caminho livre para prosperar, produzir propágulos, transferir os genes mutados para a próxima

geração e produzir uma nova população, mais numerosa e heterogênea (com variabilidade genética aumentada), de indivíduos tolerantes ou resistentes. O mau manejo de daninhas sob controle químico incorreto aumenta demasiadamente essa pressão de seleção, induzindo mais rapidamente a seleção e a multiplicação de genótipos com fenótipos de tolerância ou resistência, agravando o problema (DOMINSCHKEK et al., 2022) (Figura 4).

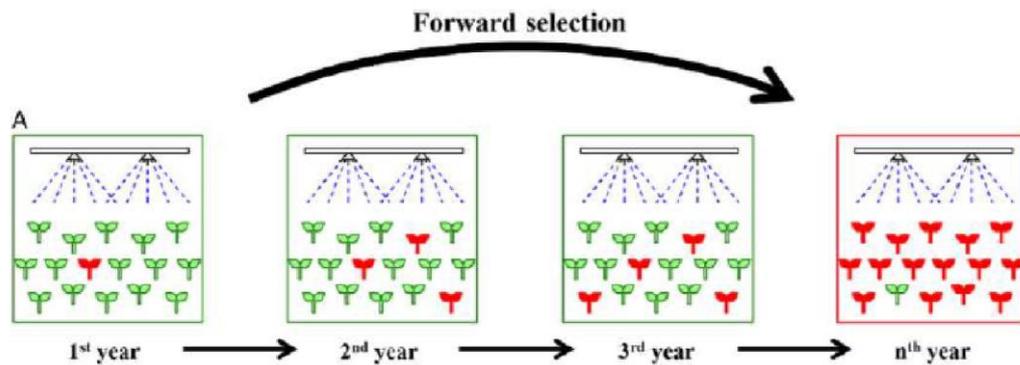


Figura 4: Aumento da pressão de seleção de daninhas mutantes resistentes a herbicidas. A aplicação sucessiva do mesmo princípio ativo, sem rotação de culturas pode acelerar a seleção de biótipos resistentes (em vermelho), que acabam se multiplicando e rapidamente constituem uma população de daninhas resistentes (DOMINSCHKEK et al., 2022).

No Brasil, há relatos de biótipos das espécies trapoeraba (*Commelina* spp), corda de viola (*Ipomoea* spp.) ,capim quente (*Spermacoce latifolia*) e poaia (*Richardia brasilienses*) com diferentes níveis de tolerância ao herbicida glifosato, inibidores de 5-enolpiruvoilxiquimato-3-fosfato (EPSPS) (Green; 2018).

O primeiro relato de resistência de daninha a herbicidas no Brasil foi em 1993 – *B. pilosa* e *E. heterophylla* resistentes aos herbicidas inibidores da enzima acetolactato sintase (ALS). Vinte anos depois, o país já apresentava 33 relatos de plantas resistentes a herbicidas. De 2013 para cá, esse número tem aumentado muito rapidamente; atualmente há casos relatados de 50 espécies de plantas daninhas resistentes a herbicidas no Brasil. Sendo que o último relato foi para *Conyza sumatrensis* com resistência múltipla a herbicidas inibidores dos fotossistemas I e II

(PSII e PSI), inibidores da protoporfirina oxidase (PPO), inibidores de EPSPS e auxinas sintéticas (GREEN et al., 2008) (Figura 5).

Figura 5: Relatos de casos de plantas daninhas resistentes no Brasil. Período 2018 a 2020. Fonte: Embrapa CNPSo.

A Figura 6 mostra os casos de plantas daninhas resistentes a herbicidas em função da sua distribuição geográfica.

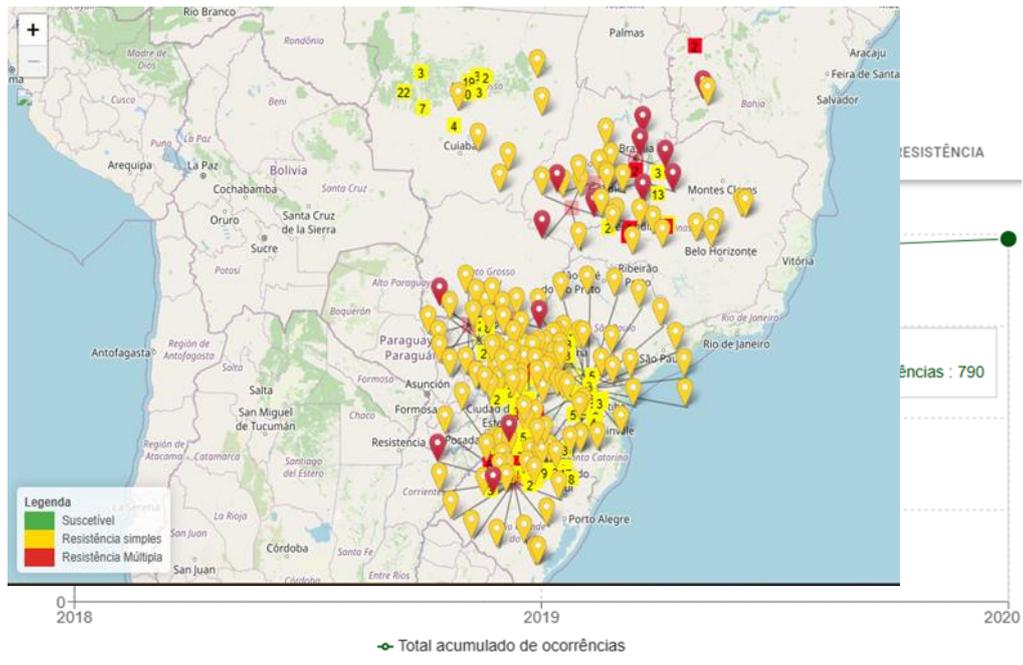


Figura 6: Distribuição espacial dos principais relatos de plantas daninhas resistentes a herbicidas no Brasil. Fonte: Embrapa CNPSo.

4.3 PLANTAS TRANSGÊNICAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

As plantas transgênicas são aquelas que receberam um ou mais genes oriundos de diferentes espécies (transgenes), os quais foram inseridos estavelmente no genoma vegetal *in vitro*, por meio de técnicas de Engenharia Genética (GREEN et al., 2008).

Elas se dividem em três grupos ou gerações:

- 1) Plantas transgênicas de 1ª Geração: são aquelas cujo(s) transgene(s) codificam novas propriedades organolépticas e nutracêuticas nas folhas, tubérculos, frutos ou grãos.
- 2) Plantas transgênicas de 2ª Geração: são as plantas geneticamente modificadas com tolerância ou resistência a formas de estresses bióticos ou abióticos.
- 3) Plantas transgênicas de 3ª Geração: biorreatores de moléculas terapêuticas ou de interesse industrial.

As plantas transgênicas da segunda geração capazes de apresentar novos fenótipos de tolerância a herbicidas são conhecidas como plantas TH. Elas representam um avanço importante no campo da biotecnologia agrícola porque elas podem expressar um ou mais transgenes capazes de dotá-las de mecanismos moleculares novos que lhes conferem tolerância a herbicidas, permitindo ampliar as possibilidades de manejo e controle mais eficientes de plantas daninhas (HEAP, 2014).

Geralmente, os transgenes presentes nas plantas TH apresentam mutações genéticas que levam a produção de enzimas levemente deformadas tridimensionalmente. Essas enzimas costumam desempenhar papéis-chaves na aceleração de reações químicas em vias metabólicas essenciais para a vida das plantas e, por isso mesmo, são os alvos moleculares específicos e preferenciais dos herbicidas (GREEN, 2012).

As plantas TH são capazes de sintetizar versões nativas dessas enzimas, as quais são neutralizadas ou inibidas irreversivelmente pelo princípio ativo de um herbicida, destruindo a sua função catalítica, mas também são capazes de produzir as versões mutadas das mesmas enzimas (codificadas pelo transgene), as quais não são reconhecidas nem interagem com o herbicida, ficando livres para acelerar a reação metabólica sem prejuízo de função. O resultado desse fenômeno é o efeito inócuo do

herbicida sobre a planta transgênica (quando aplicado em dosagem recomendada) e a morte da planta não transgênica (GREEN, 2018).

A tecnologia de plantas TH tem sido amplamente adotada em várias culturas agrícolas em todo o mundo, oferecendo benefícios significativos aos agricultores. Ao introduzir genes de tolerância a herbicidas nas plantas cultivadas, essas variedades transgênicas podem sobreviver ao tratamento tanto com herbicidas seletivos quanto não-seletivos (tolerância adquirida), enquanto as plantas daninhas são eliminadas (GREEN et al., 2008; GREEN AND OWEND, 2011).

Até 2019, um total de 351 eventos de plantas TH foram aprovados para cultivo global, distribuídos da seguinte maneira em termos de eventos: alfafa (4), canola (33), *Dianthus caryophyllus* ornamental (4), chicória (3), algodão (44), grama (1), linho (1), milho (144), canola polonesa (4), batata (4), arroz (3), soja (38), beterraba (3), cana-de-açúcar (2), tabaco (1) e trigo (1). (ISAAA, 2022)

As lavouras transgênicas HT ocupam a maior área entre as lavouras transgênicas comercializadas (57%). Plantas resistentes a insetos constituem 16% do total e plantas com ambos os traços perfazem 27%) (ISAAA, 2022).

4.4 HERBICIDAS MAIS UTILIZADOS EM PLANTAS TH NO BRASIL E SEUS MECANISMOS DE AÇÃO

Dentre os herbicidas não-seletivos mais utilizados para o controle de daninhas no Brasil estão o glifosato e o glufosinato de amônio. Esses herbicidas apresentam amplo espectro de ação contra diversas espécies de daninhas de folhas largas e estreitas, sendo muito versáteis e menos perigosos para a saúde humana e para o meio-ambiente (GREEN AND SIEHL, 2021).

Notavelmente, a maioria das plantas transgênicas TH no Brasil são tolerantes a um, a outro ou aos dois herbicidas. O glifosato inibe especificamente a enzima 5-enolpiruvil chiquimato 3-fosfato sintase (EPSPS), a principal enzima envolvida na via de biossíntese de aminoácidos aromáticos a partir de um precursor essencial chamado chiquimato. Como a via do chiquimato não está presente no reino animal, o glifosato é pouco prejudicial para seres humanos, aves, insetos e outros animais. O desenvolvimento de culturas TH ao glifosato tem se baseado na expressão heteróloga de uma forma de EPSPS insensível ao glifosato, cujo gene codificador mutado foi

prospectado da bactéria *Agrobacterium tumefaciens* (cepa CP4) (HEAP AND DUKE, 2018).

Em 1996, a soja tolerante ao glifosato (“Roundup Ready”) contendo o gene *cp4epsps* foi aprovada para comercialização nos EUA e se tornou como a primeira cultura transgênica TH no mundo. A maioria das culturas resistentes ao glifosato comercializadas apresenta esse gene (HUSSAIN et al., 2021).

Outras culturas transgênicas TH, expressam o gene que codifica a enzima glifosato oxidoredutase (GOX) derivado de *Ochrobactrum anthropi* ou o gene que codifica a enzima glifosato acetiltransferase (GAT) de *Bacillus licheniformis*. Ambas são enzimas degradadoras de glifosato que detoxificam o glifosato em subprodutos não tóxicos dentro da célula (JOSHI et al., 2023).

Portanto o glufosinato (ou fosfinotricina) inibe competitivamente a enzima glutamina sintetase (GS) (Lea et al. 1984). Esta enzima desempenha um papel na conversão de glutamato e amônia em glutamina, um aminoácido natural essencial para a síntese protéica. A inibição desta enzima pelo glufosinato leva ao acúmulo de amônia que inibe as reações do fotossistema I e II (TACHIBANA et al., 1986; SAUER et al., 1987). Dois genes bacterianos diferentes, *pat* e *bar*, de (*Streptomyces* spp). foram utilizados para o desenvolvimento de culturas resistentes ao glufosinato. Ambos os genes codificam a enzima fosfinotricina acetiltransferase (PAT) que desintoxica este herbicida por acetilação (HUSSAIN et al., 2021; HEAP AND DUKE, 2018).

Além dos herbicidas mencionados acima, recentemente foram comercializados cultivos transgênicos TH específicos para outros herbicidas, como 2,4-D, dicamba, isoxafutole, mesotrione, oxinil e sulfoniluréia. A Figura 7 mostra os principais herbicidas utilizados no mundo para o manejo de plantas daninhas em culturas TH (JOSHI et al., 2023).

GENES DE TOLERÂNCIA A HERBICIDAS

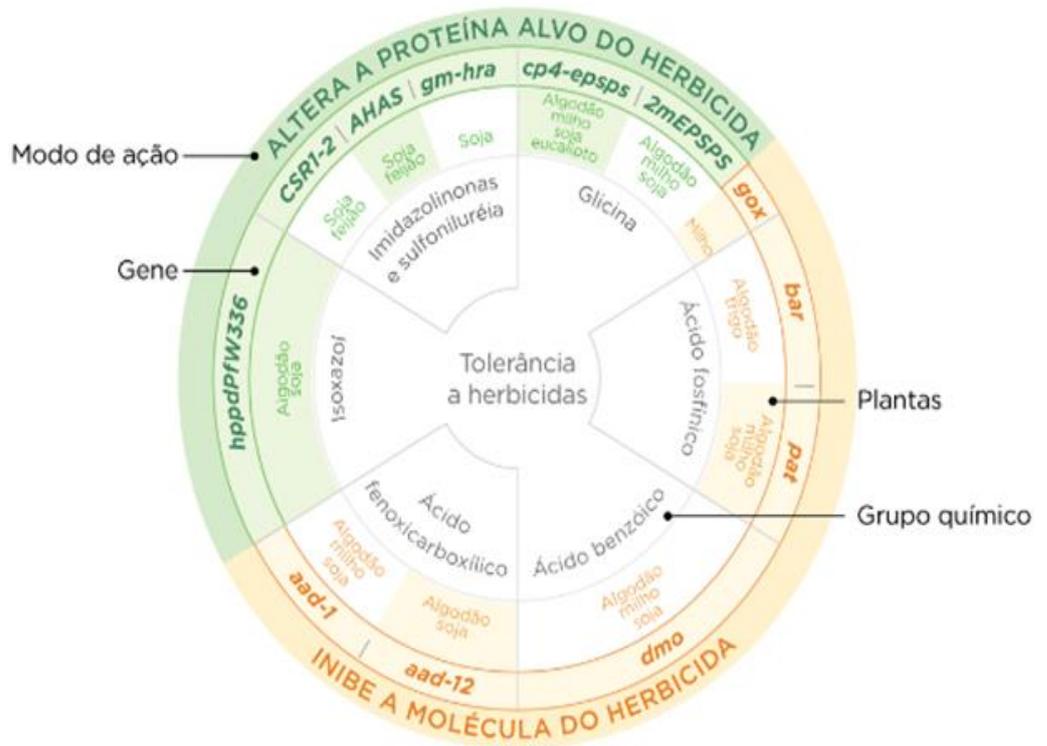


Figura 7: principais herbicidas e genes de tolerância a herbicidas utilizados no contexto de plantas TH para o manejo de plantas daninhas no mundo (CROPLIFE BRASIL, 2023).

4.5 PLANTAS TH NO BRASIL

A autorização para o cultivo de organismos geneticamente modificados (OGMs) no Brasil começou com a soja transgênica tolerante ao glifosato, em outubro de 1998. Desde então, 96 plantas transgênicas TH foram aprovadas e liberadas para o plantio em escala comercial no país pela CTNBio. Entre os produtos aprovados, há variedades de soja, milho, algodão e cana-de-açúcar (tabela 1).

Tabela 1: Eventos TH aprovados para cultivo e uso comercial no Brasil pela CTNBio

Evento Nome e código	Nome comercial
Algodão - <i>Gossypium hirsutum</i> L.:20 Eventos	
Name: 281-24-236 x 3006-210-23 x COT102 x 81910 Code: DAS-24236-5 x DAS-21Ø23-5 x SYN-IR1Ø2-7 x DAS-81910-7	não disponível

Name: 3006-210-23 x 281-24-236 x MON88913 x COT102 x DAS81910 Code: DAS-21Ø23-5 x DAS-24236-5 x MON-88913-8 x SYN-IR1Ø2-7 x DAS- 81910-7	não disponível
Name: 81910 Code: DAS-81910-7	não disponível
Name: COT102 x MON15985 x MON88913 Code: SYN-IR1Ø2-7 x MON-15985-7 x MON-88913-8	Bollgard® III x Roundup Ready™ Flex™
Name: COT102 x MON15985 x MON88913 x MON88701 Code: SYN-IR1Ø2-7 x MON-15985-7 x MON-88913-8 x MON 887Ø1-3	não disponível
Name: GHB614 Code: BCS-GHØØ2-5	GlyTol™
Name: GHB614 x LLCotton25 Code: BCS-GHØØ2-5 x ACS-GHØØ1-3	GlyTol™ Liberty Link™
Name: GHB614 x T304-40 x GHB119 Code: BCS-GHØØ2-5 x BCS-GHØØ4-7 x BCS-GHØØ5-8	Glytol™ x Twinlink™
Name: GHB614 x T304-40 x GHB119 x COT102 Code: BCS-GHØØ2-5 x BCS-GHØØ4-7 x BCS-GHØØ5-8 x SYN-IR1Ø2-7	GlyTol LibertyLink TwinLink® Plus
Name: GHB811 Code: BCS-GH811-4	não disponível
Name: GHB811 x T304-40 x GHB119 x COT102 Code: BCS-GHB811-4 x BCS-GHØØ4-7 x BCS-GHØØ5-8 x SYN-IR1Ø2-7	não disponível
Name: LLCotton25 Code: ACS-GHØØ1-3	Fibermax™ Liberty Link™
Name: MON1445 Code: MON-Ø1445-2	Roundup Ready™ Cotton
Name: MON531 x MON1445 Code: MON-ØØ531-6 x MON-Ø1445-2	Roundup Ready™ Bollgard™ Cotton
Name: MON88701 Code: MON 887Ø1-3	não disponível
Name: MON88701 x MON88913 Code: MON 887Ø1-3 x MON-88913-8	não disponível
Name: MON88913 Code: MON-88913-8	Roundup Ready™ Flex™ Cotton
Name: MON88913 x MON15985 Code: MON-88913-8 x MON-15985-7	Roundup Ready™ Flex™ Bollgard II™ Cotton
Name: T304-40 x GHB119 Code: BCS-GHØØ4-7 x BCS-GHØØ5-8	TwinLink™ Cotton
Name: T304-40 x GHB119 x COT102 Code: BCS-GHØØ4-7 x BCS-GHØØ5-8 x SYN-IR1Ø2-7	não disponível
Milho - Zea mays L.: 58 Eventos	

Name: 3272 x Bt11 x MIR604 x GA21 Code: SYN-E3272-5 x SYN-BTØ11-1 x SYN-IR6Ø4-5 x MON-ØØØ21-9	não disponível
Name: 4114 Code: DP-ØØ4114-3	não disponível
Name: 5307 x MIR604 x Bt11 x TC1507 x GA21 x MIR162 Code: SYN-Ø53Ø7-1 x SYN-IR6Ø4-5 x SYN-BTØ11-1 x DAS-Ø15Ø7-1 x MON-ØØØ21-9 x SYN-IR162-4	Agrisure® Duracade™ 5222
Name: Bt11 (X4334CBR, X4734CBR) Code: SYN-BTØ11-1	Agrisure™ CB/LL
Name: Bt11 x 5307 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-Ø53Ø7-1	não disponível
Name: Bt11 x GA21 Code: SYN-BTØ11-1 x MON-ØØØ21-9	Agrisure™ GT/CB/LL
Name: Bt11 x MIR162 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR162-4	Agrisure® Viptera™ 2100
Name: Bt11 x MIR162 x GA21 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR162-4 x MON-ØØØ21-9	Agrisure® Viptera™ 3110
Name: BT11 x MIR162 x MIR604 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR162-4 x SYN-IR6Ø4-5	Agrisure® Viptera™ 3100
Name: Bt11 x MIR162 x MIR604 x GA21 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR162-4 x SYN-IR6Ø4-5 x MON-ØØØ21-9	Agrisure® Viptera™ 3111, Agrisure® Viptera™ 4
Name: BT11 x MIR162 x MIR604 x TC1507 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR162-4 x SYN-IR6Ø4-5 x DAS-Ø15Ø7-1	não disponível
Name: BT11 x MIR162 x MIR604 x TC1507 x 5307 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR162-4 x SYN-IR6Ø4-5 x DAS-Ø15Ø7-1 x SYN-Ø53Ø7-1	não disponível
Name: Bt11 x MIR162 x MON89034 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR162-4 x MON-89Ø34-3	não disponível
Name: Bt11 x MIR162 x MON89034 x GA21 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR162-4 x MON-89Ø34-3 x MON-ØØØ21-9	não disponível
Name: Bt11 x MIR162 x NK6Ø3 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR162-4 x MON-ØØ6Ø3-6	Agrisure® Viptera™ 2100 Roundup Ready™ 2 Maize
Name: Bt11 x MIR604 Code: SYN-BTØ11-1 x SYN-IR6Ø4-5	Agrisure™ CB/LL/RW
Name: Bt11 x MON89034 Code: SYN-BTØ11-1 x MON-89Ø34-3	não disponível

Name: Bt11 x TC1507 Code: SYN-BT011-1 x DAS-01507-1	não disponível
Name: DAS40278 Code: DAS-40278-9	Enlist™ Maize
Name: DAS40278 x NK603 Code: DAS-40278-9 x MON-00603-6	não disponível
Name: GA21 Code: MON-00021-9	Roundup Ready™ Maize, Agrisure™GT
Name: MIR162 x MIR604 x TC1507 Code: SYN-IR162-4 x SYN-IR604-5 x DAS-01507-1	não disponível
Name: MIR162 x MIR604 x TC1507 x 5307 Code: SYN-IR162-4 x SYN-IR604-5 x DAS-01507-1 x SYN-05307-1	não disponível
Name: MIR162 x MIR604 x TC1507 x 5307 x GA21 Code: SYN-IR162-4 x SYN-IR604-5 x DAS-01507-1 x SYN-05307-1 x MON- 00021-9	não disponível
Name: MIR162 x MON89034 x GA21 Code: SYN-IR162-4 x MON-89034-3 x MON-00021-9	não disponível
Name: MIR162 x NK603 Code: SYN-IR162-4 x MON-00603-6	não disponível
Name: MIR162 x TC1507 Code: SYN-IR162-4 x DAS-01507-1	não disponível
Name: MON87411 Code: MON-87411-9	não disponível
Name: MON87419 Code: MON-87419-8	não disponível
Name: MON87427 Code: MON-87427-7	Roundup Ready™ Maize
Name: MON87427 x MON87419 x NK603 Code: MON-87427-7 x MON87419-8 x MON-00603-6	não disponível
Name: MON87427 x MON89034 x MIR162 x MON87411 Code: MON-87427-7 x MON-89034-3 x SYN-IR162-4 x MON-87411-9	não disponível
Name: MON87427 x MON89034 x MIR162 x NK603 Code: MON-87427-7 x MON-89034-3 x SYN-IR162-4 x MON-00603-6	não disponível
Name: MON87427 x MON89034 x TC1507 x MON87411 x 59122 x DAS40278 Code: MON-87427-7 x MON-89034-3 x DAS-01507-1 x MON-87411-9 x DAS- 59122-7 x DAS-40278-9	SmartStax™ Pro x Enlist™
Name: MON87429 Code: MON-87429-9	não disponível

Name: MON88017 Code: MON-88Ø17-3	YieldGard™ VT™ Rootworm™ RR2
Name: MON89034 x GA21 Code: MON-89Ø34-3 x MON-ØØØ21-9	não disponível
Name: MON89034 x MON88017 Code: MON-89Ø34-3 x MON-88Ø17-3	Genuity® VT Triple Pro™
Name: MON89034 x NK603 Code: MON-89Ø34-3 x MON-ØØ6Ø3-6	Genuity® VT Double Pro™
Name: MON89034 x TC1507 x MON88017 x 59122 Code: MON-89Ø34-3 x DAS-Ø15Ø7-1 x MON-88Ø17-3 x DAS-59122-7	Genuity® SmartStax™
Name: MON89034 x TC1507 x NK603 Code: MON-89Ø34-3 x DAS-Ø15Ø7-1 x MON-ØØ6Ø3-6	Power Core™
Name: MON89034 x TC1507 x NK603 x DAS40278 Code: MON-89Ø34-3 x DAS-Ø15Ø7-1 x MON-ØØ6Ø3-6 x DAS-4Ø278-9	não disponível
Name: MON89034 x TC1507 x NK603 x MIR162 Code: MON-89Ø34-3 x DAS-Ø15Ø7-1 x MON-ØØ6Ø3-6 x SYN-IR162-4	não disponível
Name: MON89034 x TC1507 x NK603 x MIR162 x DAS40278 Code: MON-89Ø34-3 x DAS-Ø15Ø7-1 x MON-ØØ6Ø3-6 x SYN-IR162-4 x DAS- 4Ø278-9	Power Core™ x MIR162 x Enlist™
Name: MZIR098 Code: SYN-ØØØ98-3	não disponível
Name: NK603 Code: MON-ØØ6Ø3-6	Roundup Ready™ 2 Maize
Name: NK603 x MON810 Code: MON-ØØ6Ø3-6 x MON-ØØ81Ø-6	YieldGard™ CB + RR
Name: NK603 x T25 Code: MON-ØØ6Ø3-6 x ACS-ZMØØ3-2	Roundup Ready™ Liberty Link™ Maize
Name: NK603 x T25 x DAS40278 Code: MON-ØØ6Ø3-6 x ACS-ZMØØ3-2 x DAS-40278-9	Roundup Ready™ Liberty Link™ Enlist™ Maize
Name: T25 Code: ACS-ZMØØ3-2	Liberty Link™ Maize
Name: TC1507 Code: DAS-Ø15Ø7-1	Herculex™ I, Herculex™ CB
Soja - Glycine max L. 17 Eventos	
Name: A2704-12 Code: ACS-GMØØ5-3	Liberty Link® soybean
Name: A5547-127 Code: ACS-GMØØ6-4	Liberty Link® soybean
Name: CV127 Code: BPS-CV127-9	Cultivance
Name: DAS44406-6 Code: DAS-444Ø6-6	não disponível

Name: DAS68416-4 Code: DAS-68416-4	não disponível
Name: DAS81419 x DAS44406 Code: DAS-81419-2 x DAS-44406-6	Conkesta Enlist E3™ Soybean
Name: DP305423 x GTS 40-3-2 Code: DP-305423-1 x MON-04032-6	não disponível
Name: FG72 (FG072-2, FG072-3) Code: MST-FG072-2	não disponível
Name: FG72 x A5547-127 Code: MST-FG072-2 x ACS-GM006-4	Liberty Link® GT27™
Name: GMB151 Code: BCS-GM151-6	não disponível
Name: GTS 40-3-2 (40-3-2) Code: MON-04032-6	Roundup Ready™ soybean
Name: GTS 40-3-2 x A5547-127 Code: MON-04032-6 x ACS-GM006-4	Roundup Ready™ Liberty Link® soybean
Name: HB4 x GTS 40-3-2 Code: IND-00410-5 x MON-04032-6	não disponível
Name: MON87701 x MON89788 Code: MON-87701-2 x MON-89788-1	Intacta™ Roundup Ready™ 2 Pro
Name: MON87708 Code: MON-87708-9	Genuity® Roundup Ready™ 2 Xtend™
Name: MON87708 x MON89788 Code: MON-87708-9 x MON-89788-1	não disponível
Name: MON87751 x MON87701 x MON87708 x MON89788 Code: MON-87751-7 x MON-87701-2 x MON87708-9 x MON89788-1	não disponível
Cana-de-açúcar - <i>Saccharum sp.</i> 1 Evento	
Name: MON87427 x MON95379 x MON87411 Code: MON-87427-7 x MON-87411-9 x MON-95379-3	não disponível

Pode-se observar o grande predomínio de eventos TH de milho no Brasil (58 eventos), com participações equivalentes de algodão (20 eventos) e soja (17 eventos) e apenas 1 evento de cana. Os dados acerca do milho e do algodão TH no país podem ser observados na Figura 8:

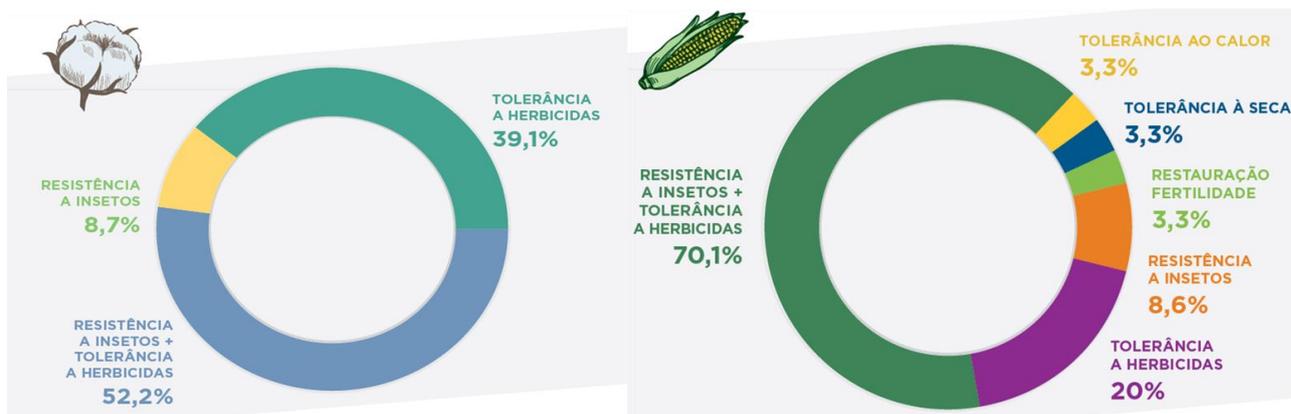


Figura 8: Participação do algodão e do milho TH em relação ao plantas transgênicas com outros traços fenotípicos no Brasil, em 2022. Fonte: CTNBio.

Além das categorias de eventos TH no Brasil, é possível observar o cenário das empresas desenvolvedoras de tecnologias TH no país, com amplo predomínio das companhias Monsanto e Syngenta (ISAAA, 2022) (Tabela 2).

Tabela 2: Participação de companhias desenvolvedoras de tecnologias TH no brasil e os seus eventos transgênicos organizados por cultura.

Empresa	Eventos	Eventos por cultura
BASF	5	Algodão-1
		Soja-4
BASF e Bayer CropScience	1	Algodão-1
Bayer Australia	1	Milho-1
Bayer CropScience	10	Algodão-7
		Milho-1
		Soja-2
Dow AgroSciences LLC	11	Algodão-3
		Milho-5
		Soja-3
Dow AgroSciences LLC e DuPont (Pioneer Hi-Bred International Inc.)	5	Milho-5
DuPont (Pioneer Hi-Bred International Inc.)	7	Milho-6
		Soja-1
INDEAR	1	Soja-1
Monsanto Company	28	Algodão-8
		Milho-15
		Soja-5
Monsanto Company e Bayer CropScience	1	Cana-1
Monsanto Company e Dow AgroSciences LLC	2	Milho-2
Syngenta	24	Milho-23
		Soja-1

A Figura 9 mostra o percentual de cultivos TH no Brasil em comparação com as plantas com traços empilhados e com as convencionais (não transgênicas). É possível notar um amplo predomínio da participação percentual dos cultivos transgênicos em

relação aos convencionais, refletindo a facilidade de manejo e ganhos de rentabilidade média que os primeiros apresentam em relação aos segundos.

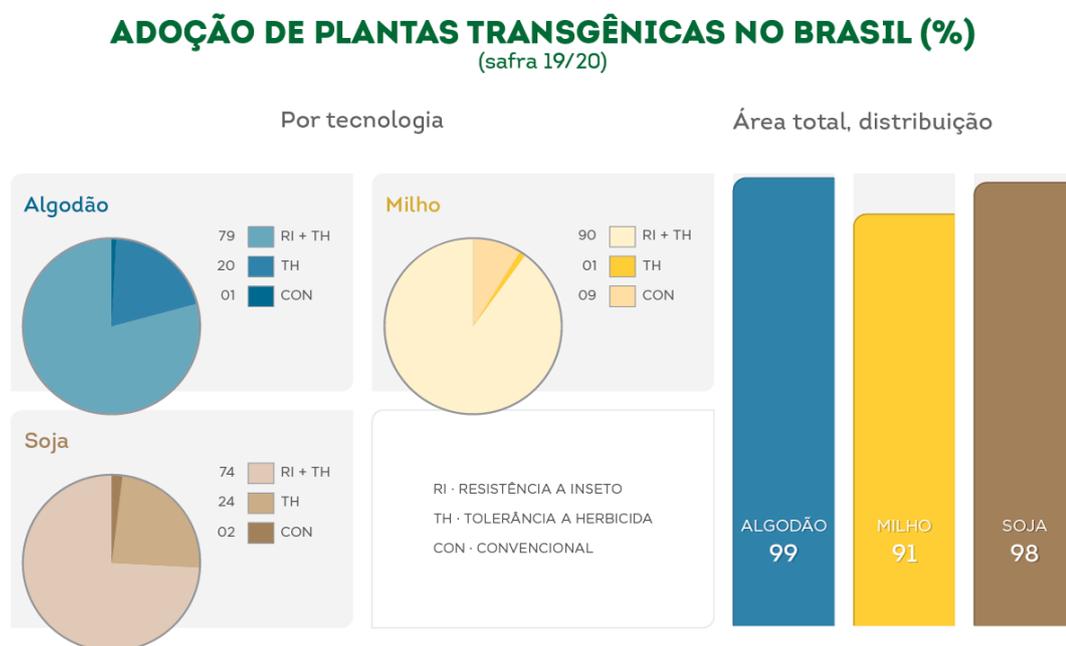


Figura 9: Adoção de culturas GM no Brasil em comparação com as culturas convencionais na safra 2019/2020. Fonte: (CROPLIFE BRASIL, 2020).

A região Sul apresenta maior concentração de lavouras com plantas TH no Brasil (37%). Em seguida, aparecem as regiões Sudeste (28%) e Centro-Oeste (25%). A região Norte é a que tem menor utilização dessa tecnologia (3%), seguida pela região Nordeste (7%). Os estados com maior produção de plantas TH são Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul (CROPLIFE BRASIL, 2020).

4.6 ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE CUSTO DE PRODUÇÃO DE HERBICIDAS APÓS A ADOÇÃO DE LAVOURAS TH NO BRASIL

Segundo Green e colaboradores, na cultura do milho, o aumento do número de cultivos geneticamente mudados "aumenta a produtividade e reduz os custos", de modo que as características introduzidas nas plantas transgênicas beneficiam diretamente o produtor e indiretamente o meio ambiente (GREEN, 2012).

No estudo, a adoção de lavouras transgênicas de milho TH resultou em uma redução significativa nos custos totais de produção, queda de cerca de 17% em comparação com o milho convencional. Isso se deve principalmente à redução da necessidade de aplicação

intensiva de herbicidas na lavoura. Além disso, os agricultores não tiveram que empregar trabalhadores para capinar as lavouras durante o período de plantio e germinação. Os resultados da pesquisa confirmam que a adoção de lavouras transgênicas tolerantes ao herbicida pode reduzir significativamente os custos de produção de soja, milho e algodão no Brasil. Além disso, essas lavouras são altamente eficientes e podem aumentar a produtividade, permitindo aos agricultores plantar mais hectares a um custo reduzido. É importante considerar que as regiões do país enfrentam diferentes desafios de produção e, portanto, o impacto da adoção de lavouras transgênicas pode variar de lugar para lugar (GREEN, 2012).

4.7 DESAFIOS DA TECNOLOGIA TH NO BRASIL

A adoção global de culturas geneticamente modificadas nas últimas duas décadas trouxe benefícios econômicos e ambientais em escala global, aumentando o rendimento das culturas e aumentando a renda dos agricultores (LAMICHHANE et al., 2017). No entanto, existem algumas preocupações quanto ao mau manejo de plantas TH .

O cultivo intensivo de plantas transgênicas TH, se associado ao mau manejo de daninhas, pode aumentar a pressão de seleção de plantas daninhas tolerantes a herbicidas (NERKAR et al., 2022). Se se tratarem de plantas com traços empilhados envolvendo tolerância a herbicidas e resistência a insetos, a aplicação errônea de inseticidas pode elevar a pressão de seleção de insetos resistentes a inseticidas e também afetar insetos não-alvo.

Exemplos do fenômeno podem ser observados em três espécies de pragas: *Busseola fusca* (broca africana de caule) em milho transgênico HT/Bt na África do Sul (Rensburg 2007), *Spodoptera frugiperda* (lagarta de cartucho) em milho HT/Bt em Porto Rico (Storer et al. 2010) e *D. virgifera* (lagarta da raiz do milho ocidental) em milho HT/Bt nos EUA (NERKAR et al., 2022).

Em algodão HT/Bt foram relatados exemplos de duas espécies de pragas resistentes a inseticidas: *Pectinophora gossypiella* (lagarta rosa) na Índia (Bagla 2010) e *Helicoverpa zea* (lagarta do algodão) nos EUA (Luttrell et al. 200 ; Tabashnik et al. 2008; Tabashnik e Carreira 2010). Além disso, uma análise de 77 estudos confirmou o incremento, a nível de campo, de resistência de pragas a inseticidas em culturas Bt mal manejadas, envolvendo 5 das 13 principais espécies de pragas (BROOKES, 2014).

Um dos principais fatores limitantes para o desenvolvimento e implantação de produtos agrícolas transgênicos é o alto custo da avaliação de segurança e o longo e complexo processo de aprovação regulamentar necessário para comercialização estimou que o custo médio para avaliação de segurança regulatória, obtenção de registro global e autorizações foi de US\$ 35,01 milhões (OWEN et al., 2015).

Estima-se ainda que o processo completo, desde o início de um projeto de desenvolvimento de uma cultura transgênica até seu lançamento comercial, leva cerca de 13 anos. As avaliações de segurança e obtenção de aprovação regulatória representam a fase mais longa no processo de desenvolvimento e comercialização de produtos transgênicos (MCDOUGALL, 2011). Owen e colaboradores estimaram que o tempo médio de aprovação dessas culturas para passar pelos canais regulatórios da União Europeia (UE) e dos Estados Unidos (EUA) foi de cerca de 5 anos (1.763 dias) e 7 anos (2.467 dias), respectivamente (OWEN et al., 2015).

Devido ao alto consumo de recursos e demorado processo de aprovação regulatória, o desenvolvimento e a comercialização de transgênicos não são acessíveis a pequenas empresas e instituições públicas, o que, por sua vez, atua como um gargalo para a entrada de pequenas empresas de biotecnologia neste setor. Apesar disso, desde 2016, plantas geneticamente editadas não são consideradas transgênicas no Brasil, acompanhando o entendimento legal sobre o assunto nos EUA (PINHEIRO et al., 2023).

4.8 NOVAS TECNOLOGIAS EMERGENTES: EDIÇÃO DE GENOMA E PLANTAS COM “STACKED TRAITS”

Entre as tecnologias de modificação genética, a tecnologia de edição do genoma é a mais recente. As tecnologias de edição do genoma podem ser usadas para que gene(s) específico(s) e/ou outros elementos genéticos possam ser mutados, eliminados ou substituídos de forma pontual, sutil e precisa no genoma da planta, de maneira sítio dirigida (PINHEIRO et al., 2023).

A tecnologia de edição de genoma mais promissora para uso em culturas TH é o sistema CRISPR/Cas9 (que utiliza sistema repetições palindrômicas curtas agrupadas regularmente interespaçadas “CRISPR” e a enzima Cas9) (WONG et al., 2022).

A enzima bacteriana Cas9 é capaz de reconhecer e se ligar especificamente a uma sequência de DNA alvo no genoma da planta, guiada por um RNA especial, o RNA guia

(sgRNA). Uma vez reconhecido o sítio genômico de edição, a enzima Cas9 catalisa a quebra de ligações fosfodiéster em ambas as fitas do DNA, produzindo uma lesão do tipo “quebras de fita dupla (DSBs)”. As lesões DSBs são geralmente separados por um mecanismo de reparo endógeno propenso a erros (Non-homologous end join/NHEJ) ou utilizando uma adição externa modelo de reparo de DNA homólogo (reparo dirigido por homologia/HDR) (WONG et al., 2022).

Explorar ambos os mecanismos de reparo permitem obter mutações no local alvo, como nocaute de gene (inserção/deleção levando a mutações de deslocamento de quadro) via NHEJ ou substituição/substituição de sequência alvo precisa (mutações pontuais ou substituição de gene alvo ou inserção de gene específico do local) via HDR (YU et al., 2022). Apesar do alto grau de precisão e acurácia do sistema CRISPR/Cas9, é possível a ocorrência de edição gênica em sítios não alvo (os chamados “off-targets”) (WONG et al., 2022). Aperfeiçoamentos tecnológicos estão diminuindo, paulatinamente os off-targets em plantas editadas, o que aumenta o potencial de uso dessa tecnologia para a obtenção mais rápida de eventos elite, com fenótipos altamente potentes para a agropecuária (NERKAR et al., 2022).

Outra revolução são as já mencionadas plantas com traços empilhados, dotadas de múltiplos transgene, cada um codificador de um traço fenotípico desejável. Ela permite a obtenção de plantas tolerantes a múltiplos herbicidas e/ou resistente a diversas espécies de insetos, tudo no mesmo pacote tecnológico, com grande potencial de diversificar a escolha das moléculas para controle de daninhas, diminuindo a necessidade de rotação de princípios ativos de herbicidas (ainda que não a eliminando) e possibilitando uma maior adaptação às sazonalidades envolvidas na condução da lavoura no que diz respeito à infestação de plantas daninhas. As primeiras plantas deste tipo já chegaram ao Brasil e são adotadas por grande margem percentual, conforme mostram as figuras 8 e 9 anteriormente (WONG et al., 2022; YU et al., 2022).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As plantas TH são uma das ferramentas mais importantes da biotecnologia vegetal. Elas facilitam o manejo de daninhas e representam diminuição dos custos de produção e aumento da lucratividade da atividade agropecuária para milhares de produtores brasileiros. A adoção de plantas TH no Brasil é ampla e vem crescendo, principalmente

nas plantas com traços empilhados. As principais culturas brasileiras hoje apresentam tecnologia TH, com impacto positivo sensível na produtividade nacional de grãos, fibras e bioenergia.

O mau manejo de daninhas no contexto das tecnologias TH é um risco de seleção de plantas infestantes tolerantes a herbicidas e deve ser minimizado com informação técnica e conscientização de produtores e empregados das propriedades.

As novas tecnologias de edição de genoma e de plantas com traços empilhados apresentam enorme potencial (que já está se confirmando) para aumentar a produtividade agrícola, diminuir o tempo de obtenção de plantas-elite, reduzir custos e maximizar a lucratividade para o produtor, além de facilitar o manejo, diversificar a escolha de herbicidas e, racionalmente, minimizar a pressão de seleção de plantas daninhas tolerantes a herbicidas, talvez o mais preocupante desafio da agricultura moderna no Brasil.

6. REFERÊNCIAS

- ALRIDIWIRSAH, KOKO TAMPUBOLON,NOVILDA ELIZABETH MUSTUMU, MUYIYO, and MEHDIZADEH MOHAMMAD, 2022. **“Weed Diversity as Affected by Tillage and Ammonium Glufosinate Herbicide.”** *Pesquisa Agropecuária Tropical*.2022,52
- BALBINOT JR., ALVADI ANTONIO,NILSON GILBERTO FLECK, DIRCEU AGOSTINETTO, and MAURO ANTONIO RIZZARDI.2002. **“Predação de Sementes de Plantas Daninhas Em Áreas Cultivadas.”** *Ciência Rural*.2022
- BANERJEE, SANGEETA, ANANYA MUKHERJEE, and ATREYEE KUNDU 2023 **“The Current Scenario and Future Perspectives of Transgenic Oilseed Mustard by CRISPR-Cas9.”** *Molecular Biology Reports* 50 (9): 7705–28. <https://doi.org/10.1007/s11033-023-08660-6>.
- BECKIE, HUGH J.2011. **“Herbicide-Resistant Weed Management: Focus on Glyphosate.”** *Pest Management Science* 67 (9): 1037–48. <https://doi.org/10.1002/ps.2195>.
- BROOKES, GRAHAM. 2014. **“Weed Control Changes and Genetically Modified Herbicide Tolerant Crops in the USA 1996-2012.”** *GM Crops & Food* 5 (4): 321–32. <https://doi.org/10.4161/21645698.2014.958930>.
- CAMPS, MARCOS L DE, MARLON L.LACERDA, IGNACIO ASPIAZÚ,ABNER J DE CARVALHO and RAFAEL F SILVA.2023. **“Weed Interference Periods in Cowpea Crop.”** *Revista Caatinga*.
- CARVALHO, DONATO RIBEIRO DE , HAMURÁBI ANIZIO LINS, MATHEUS DE FREITAS SOUZA, TATIANE SEVERO SILVA, MARIA ALICE FORMIGA PORTO, VANDER MENDONÇA, and DANIEL VALADÃO SILVA. 2022. **“Weed Control in Melon with Preemergence Herbicides.”** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. .

- CHRISTOFFOLETI, P J, and R LÓPEZ-OVEJERO. 2003. **“Principais Aspectos Da Resistência de Plantas Daninhas Ao Herbicida Glyphosate.”** *Planta Daninha*. .
- COSTA, AUGUSTO GUERREIRO FONTOURA, VALDINEI SOFIATTI, CLÉBER DANIEL DE GÓES MACIEL, JULIANA PARISOTTO POLETINE, and JOÃO IGOR DE SOUSA. 2014. **“Weed Management Strategies for Castor Bean Crops.”** *Acta Scientiarum. Agronomy*. .
- D’AMICO-DAMIÃO, VICTOR, ARTHUR ARROBAS MARTINS BARROSO, PEDRO LUIS DA COSTA ALVES, and LEANDRO BORGES LEMOS. 2020. **“Intercropping Maize and Succession Crops Alters the Weed Community in Common Bean under No-Tillage.”** *Pesquisa Agropecuária Tropical*. .
- DOMINSCHKE, RUBIA, MAURÍCIO ZANOVELLO SCHUSTER , ARTHUR ARROBAS MARTINS BARROSO, ANIBAL MORAES, IBANOR ANGHINONI , and PAULO CÉSAR DE FACCIO CARVALHO. 2022. **“Diversification of Traditional Paddy Field Impacts Target Species in Weed Seedbank<sup/>.”** *Revista Ciência Agronômica 2022*
- DUKE, STEPHEN O. 2015. **“Perspectives on Transgenic, Herbicide-Resistant Crops in the United States Almost 20 Years after Introduction.”** *Pest Management Science* 71 (5): 652–57. <https://doi.org/10.1002/ps.3863>.
- GREEN, JERRY M. 2012. **“The Benefits of Herbicide-Resistant Crops.”** *Pest Management Science* 68 (10): 1323–31. <https://doi.org/10.1002/ps.3374>.
- . 2014. **“Current State of Herbicides in Herbicide-Resistant Crops.”** *Pest Management Science* 70 (9): 1351–57. <https://doi.org/10.1002/ps.3727>.
- . 2018. **“The Rise and Future of Glyphosate and Glyphosate-Resistant Crops.”** *Pest Management Science* 74 (5): 1035–39. <https://doi.org/10.1002/ps.4462>.
- GREEN, JERRY M, CHRISTINE B HAZEL, D. RAUMOND FORNEY and LUANN M PUGH. 2008. **“New Multiple-Herbicide Crop Resistance and Formulation Technology to Augment the Utility of Glyphosate.”** *Pest Management Science* 64 (4): 332–39. <https://doi.org/10.1002/ps.1486>.

- GREEN, JERRY M, and MICHEAL D K OWEN. 2011. “**Herbicide-Resistant Crops: Utilities and Limitations for Herbicide-Resistant Weed Management.**” *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59 (11): 5819–29. <https://doi.org/10.1021/jf101286h>.
- GREEN, JERRY M, and DANIEL L SIEHL. 2021. “History and Outlook for Glyphosate-Resistant Crops.” *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 255: 67–91. https://doi.org/10.1007/398_2020_54.
- HEAP, IAN. 2014. “**Global Perspective of Herbicide-Resistant Weeds.**” *Pest Management Science* 70 (9): 1306–15. <https://doi.org/10.1002/ps.3696>.
- HEAP, IAN, and STEPHEN O , DUKE. 2018. “**Overview of Glyphosate-Resistant Weeds Worldwide.**” *Pest Management Science* 74 (5): 1040–49. <https://doi.org/10.1002/ps.4760>.
- HUSSAN, AMJAD, XIAO DING, MUNA ALARIQI, HAKIM MANGHWAR, FENGJIAO HUI, YAPEI LI, JUNQI CHENG, CHENGLIN WU JINLIN CAO and SHUANGXIA JIN. 2021. “**Herbicide Resistance: Another Hot Agronomic Trait for Plant Genome Editing.**” *Plants (Basel, Switzerland)* 10 (4). <https://doi.org/10.3390/plants10040621>.
- JOSHI, ALPANA, SEO-YEON YANG, HYUNG-GEUN SONG, JIHO MIN and JI-HOON LEE. 2023. “**Genetic Databases and Gene Editing Tools for Enhancing Crop Resistance against Abiotic Stress.**” *Biology* 12 (11). <https://doi.org/10.3390/biology12111400>.
- LAMICHHANE, JAY RAM, YANN DEVOS, HUGH J BECKIE, MICHEAL D K OWEN, PASCAL TILLIE, ANTOINE MESSÉAN, and PER KUDSK. 2017. “**Integrated Weed Management Systems with Herbicide-Tolerant Crops in the European Union: Lessons Learnt from Home and Abroad.**” *Critical Reviews in Biotechnology* 37 (4): 459–75. <https://doi.org/10.1080/07388551.2016.1180588>.
- MAJRASHI, A A. 2022. “**Preliminary Assessment of Weed Population in Vegetable and Fruit Farms of Taif, Saudi Arabia.**” *Brazilian Journal of Biology*.
- MARCHI, SIDNEI R DE , RICARDO F MARQUES, PRISSILA P DOS S ARAUJO, IIGNER T D SILVA , and DAGOBERTO MARTINS. 2022. “**Weed**

- Interference in Marandu Palisade Grass Pastures under Renewal or Maintenance Conditions.”** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2022,
- MARTINS, D, C C MARTINS, and A C SILVA JR. 2019. **“Weed Management and Herbicide Selectivity in Ornamental Plants.”** *Planta Daninha*.2022
- NERKAR, GAURI, SUMAN DEVARUMATH, MADHIVA PURANKAR, ATUL KUMAR, R VALARMATHI, RACHAYYAB DEVARUMATH and C APPUNU. 2022. **“Advances in Crop Breeding Through Precision Genome Editing.”** *Frontiers in Genetics* 13: 880195. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.880195>.
- OWEN, MICHEAL DK, HUGH J BECKIE, JULIA Y LEESON, JASON K NORSWORTHY, and LARRY E STECKED. 2015. **“Integrated Pest Management and Weed Management in the United States and Canada.”** *Pest Management Science* 71 (3): 357–76. <https://doi.org/10.1002/ps.3928>.
- PINHEIRO, RODRIGO ALMEIDA, TAYNA SOUSA DUQUE ,GABRIELA MADUREIRA BARROS, MARCUS ALVARENGA SOARES, CASSIA MICHELLE CABRAL, JOSÉ COLA ZANUNCIO and JOSÉ BARBOSA DOD SANTOS.2023. **“Herbicides May Threaten Advances in Biological Control of Diseases and Pests.”** *Environmental Science and Pollution Research International* 30 (52): 111850–70. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30198-0>.
- WONG, ALBERT CHERN SUN, KAREN MASSEL, YASMINE LAM, JESSICA HINTZSCHE, and BHAGIRATH SINGH CHAUHAN. 2022. **“Biotechnological Road Map for Innovative Weed Management.”** *Frontiers in Plant Science* 13: 887723. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.887723>.
- YU, HAOQIANG, QINGQING YANG, FENG LING FU, and WANCHEN LI. 2022. **“Three Strategies of Transgenic Manipulation for Crop Improvement.”** *Frontiers in Plant Science* 13: 948518. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.948518>.

