

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS
ESCOLA DE ECONOMIA DE SÃO PAULO

ROBERTO MELO DE ARAÚJO

**ANÁLISE DA CONJUNTURA ATUAL, DESAFIOS E OPORTUNIDADES DO USO
DO CONTROLE BIOLÓGICO NO MANEJO DE RESISTÊNCIA DE PRAGAS ÀS
PLANTAS GENETICAMENTE MODIFICADAS DE ALGODÃO, MILHO E SOJA
COM TECNOLOGIA BT NO BRASIL**

SÃO PAULO

2022

ROBERTO MELO DE ARAÚJO

**ANÁLISE DA CONJUNTURA ATUAL, DESAFIOS E OPORTUNIDADES DO USO
DO CONTROLE BIOLÓGICO NO MANEJO DE RESISTÊNCIA DE PRAGAS ÀS
PLANTAS GENETICAMENTE MODIFICADAS DE ALGODÃO, MILHO E SOJA
COM TECNOLOGIA BT NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas – EESP/FGV, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronegócio.

Área de concentração: Gestão do Agronegócio
Orientador: Prof. Dr. José Roberto Postali Parra

SÃO PAULO

2022

Araújo, Roberto Melo de.

Análise da conjuntura atual, desafios e oportunidades do uso do controle biológico no manejo de resistência de pragas às plantas geneticamente modificadas de algodão, milho e soja com tecnologia BT no Brasil / Roberto Melo de Araújo. - 2022.

112 f.

Orientador: Jose Roberto Postali Parra.

Dissertação (mestrado profissional MPAGRO) – Fundação Getulio Vargas, Escola de Economia de São Paulo.

1. Pragas agrícolas - Controle biológico. 2. Inseticidas biológicos. 3. Resistencia a inseticidas. 4. Inovações agrícolas. I. Parra, Jose Roberto Postali. II. Dissertação (mestrado profissional MPAGRO) – Escola de Economia de São Paulo. III. Fundação Getulio Vargas. IV. Título.

CDU 632.9

ROBERTO MELO DE ARAÚJO

**ANÁLISE DA CONJUNTURA ATUAL, DESAFIOS E OPORTUNIDADES DO USO
DO CONTROLE BIOLÓGICO NO MANEJO DE RESISTÊNCIA DE PRAGAS ÀS
PLANTAS GENETICAMENTE MODIFICADAS DE ALGODÃO, MILHO E SOJA
COM TECNOLOGIA BT NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Escola de
Economia de São Paulo da Fundação
Getulio Vargas – EESP/FGV, como
requisito para obtenção do título de Mestre
em Agronegócio.

Área de concentração: Gestão do
Agronegócio

Data de aprovação: ___/___/_____

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Roberto Postali Parra
FGV-EESP / USP-ESALQ (orientador)

Prof. Dr. Alexandre de Sene Pinto
FGV-EESP / USP-ESALQ / CUML

Prof. Dr. Pedro Takao Yamamoto
USP-ESALQ

DEDICATÓRIA

Dedico e agradeço a minha esposa Fernanda Peres Arraes, a minha mãe Lúcia Maria Melo de Araújo e ao meu pai Fernando Ferreira de Araújo (*in memoriam*), por todo amor, incentivo e apoio que sempre recebi para estudar e aprender continuamente. Aos meus filhos Pedro Arraes de Araújo e Júlia Arraes de Araújo, que me motivaram, foram solidários e muito compreensivos nessa etapa tão importante da minha vida. A todos os familiares, amigos e professores que acreditaram e impulsionaram a minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho é resultado do conhecimento desenvolvido e compartilhado por muitos profissionais que se dedicam ao desenvolvimento agrícola sustentável, com base na ciência e inovação tecnológica. Registro aqui meus agradecimentos a alguns destes especialistas, mestres, doutores e amigos que contribuíram com informações, dados, literatura científica, publicações, opiniões, palavra amiga e inspiração para que eu pudesse estudar e aprender um pouco mais sobre o tema da presente dissertação: Adeney De Freitas Bueno (Embrapa), Adriano Lobato (Syngenta), Alexandre de Sene Pinto (FVG-EESP), Álvaro Luiz Dilli Gonçalves (SLC Agrícola), Amália Cristina Piazzentim Borsari (CropLife Brasil), André Malzoni Dias (Spark), Andreza Martinez (CropLife Brasil), Celso Omoto (ESALQ/USP), Christian Lohbauer (CropLife Brasil), Cristiano Limberger (Spark), Décio Luiz Gazzoni (Embrapa), Douglas Broetto (SLC Agrícola), Edivan José Possamai (IDR-PR), Fábio Diniz Del Cistia (Helm), Fábio Santos (BASF), Felipe Antônio Domingues (Oxitec), Felipe Cauê Serigati (FGV-EESP), Fernando Gava (BASF), Fernando Hercos Valicente (Embrapa), Flaviane Marcolin de Medeiros (SENAR-PR), João César Rando (inpEV), Laércio Dalla Vecchia (agricultor), Lucas Magro Koren (IMBR Agro), Luis Antônio Pavan (Consultor P&D), Marcelo Poletti (Promip), Mateus Moraes Tavares (SENAR), Mônica Bergamaschi (ABAG/RP), Murilo Moreira (Agbitech), Patrick Marques Dourado (Bayer CropScience), Paulo Campante (CropLife Brasil), Oderlei Bernardi (UFES), Odnei Donizete Fernandes (BASF), Osmar Conte (Embrapa) e Othon Silva Abrahão (CropLife Brasil).

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a conjuntura atual, os desafios e oportunidades dos bioinseticidas serem utilizados na estratégia de Manejo de Resistências a Inseticidas (MRI) em plantas Geneticamente Modificadas (GM) de algodão, milho e soja com proteínas Bt (*Bacillus thuringiensis*), contribuindo com propostas para a sustentabilidade da tecnologia. Na safra 2020/2021 os cultivos de algodão, milho e soja ocuparam 60,2 milhões de hectares e atingiram mais de 227 milhões de toneladas, representando cerca de 46% do valor bruto da produção agropecuária brasileira em 2021.

Ao proporcionar diversos benefícios, os cultivos GM com tecnologia Bt se tornaram uma preferência nacional e atingiram taxa de adoção de 99% no algodão, 91% no milho e 98% na soja na safra 2019/2020. Esses altos índices de adoção, sem a implementação proporcional das áreas de refúgio agrícola (não-Bt) em conformidade, aumentaram a pressão de seleção e o risco de ocorrência de resistência de insetos (Lepidoptera: Noctuidae) às lavouras GM com proteínas Bt, podendo comprometer a longevidade da tecnologia.

Apesar dos esforços para conscientizar os agricultores sobre a necessidade do refúgio (não-Bt) para evitar ou retardar a ocorrência de resistência de lagartas aos cultivos Bt, a taxa de adoção dessas áreas é decrescente, sendo necessário investigar as razões e propor soluções para o problema, pois em um cenário de aumento da população de insetos resistentes não controlados pelos cultivos GM com proteínas Bt, os benefícios econômicos e socioambientais conquistados com tecnologia seriam perdidos, gerando impactos negativos para os agricultores e a sociedade. Por outro lado, o ecossistema de inovação com AgTechs e o mercado de Controle Biológico (CB) estão em ascensão, criando novas oportunidades. Com base na literatura científica e em dados do mercado, o CB é considerado peça-chave no MRI e no MIP.

Após avaliar as soluções possíveis, utilizando métodos de comprovação para reunir e avaliar se existem suposições cabíveis como resposta, o estudo confirmou a hipótese de que os bioinseticidas são viáveis para o MRI nos cultivos GM com tecnologia Bt e propõe a realização de pesquisas aplicadas, o desenvolvimento de conteúdos educativos, transferência de tecnologia, ações para acelerar a adoção do

CB, assim como o desenvolvimento de política pública mais eficaz para promover o manejo de resistências nos cultivos de algodão, milho e soja.

Palavras-chave: Refúgio agrícola; Controle Biológico; Manejo de resistências. Inseticidas; Tecnologia Bt.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the current situation, challenges, and opportunities for bioinsecticides to be used in the Insecticide Resistance Management (IRM) strategy in Genetically Modified (GM) cotton, corn, and soybean plants with Bt proteins (*Bacillus thuringiensis*), contributing with proposals for the sustainability of technology. In the 2020/2021 season, cotton, corn, and soybean crops occupied 60,2 million hectares and reached more than 227 million tons, representing about 46% of the gross value of Brazilian agriculture in 2021.

Providing numerous benefits, GM crops with Bt technology have become a national preference and have reached an adoption rate of 99% in cotton, 91% in corn and 98% in soybeans in the 2019/2020 season. These high adoption rates, without proportional implementation of agricultural refuge areas (non-Bt) in compliance, have increased the selection pressure and the risk of occurrence of insect (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to GM crops with Bt proteins, putting at risk the sustainability of the technology. Despite efforts to make farmers aware of the need for agricultural refuge to avoid or delay the occurrence of caterpillars resistance to Bt crops, the rate of adoption of refuge areas (non-Bt) is decreasing, and it is necessary to investigate the reasons and propose actions to solve the problem, because in a scenario of an increase in the population of resistant insects not controlled by GM crops with Bt proteins, the economic and socio-environmental benefits achieved with technology would be lost, generating negative impacts for farmers and society. On the other hand, the innovation ecosystem with AgTechs and the Biological Control (BC) market are on the rise, creating new opportunities. Based on scientific literature and market data, BC is considered a key part of IRM and Integrated Pest Management (IPM).

After evaluating the possible solutions, using verification methods to gather and assess whether there are reasonable assumptions as an answer, the study confirmed the hypothesis that bioinsecticides are viable for IRM in GM crops with Bt technology and proposes the accomplishment of applied research, the development of educational content, technology transfer, actions to accelerate the adoption of BC, as

well as the development of more effective public policy to promote resistance management in cotton, corn and soybean crops.

Keywords: Agricultural refuge; Biological control; Resistance management; Insecticides; Bt technology.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 Cultivos de algodão, milho e soja no Brasil.....	14
2.2 Impacto das perdas causadas por pragas nas lavouras	16
2.2.1 Lagarta-do-cartucho (<i>Spodoptera frugiperda</i>).....	18
2.2.2 Lagarta falsa-medideira (<i>C. includens</i>)	19
2.2.3 <i>H. armigera</i>	20
2.3 A tecnologia Bt e a importância para o algodão, milho e soja.....	21
2.4 Adoção da biotecnologia no algodão, milho e soja	23
2.5 A evolução da resistência de insetos à tecnologia Bt	24
2.6 Estratégias de Manejo de Resistência a Inseticidas (MRI)	26
2.6.1 Refúgio agrícola.....	26
2.6.2 Conceito de alta dose/refúgio	27
2.6.3 Refúgio “no saco de sementes”	29
2.7. Legislação.....	29
2.7.1 Regulamentação sobre biotecnologia.....	29
2.7.2. Regulamentação de produtos biológicos	30
2.8 O mercado de produtos para controle biológico.....	33
2.9 Relações ecológicas no controle biológico	35
2.9.1 Relações tritróficas	35
2.9.2 Inimigos naturais no controle biológico	36
2.10 Soluções de controle biológico para ordem Lepidoptera	37
2.10.1 Baculovirus	38
2.10.2 Semioquímicos	39
2.10.3 Macrorganismos (parasitoides e predadores).....	41
2.11 Monitoramento de lepidópteros em algodão, milho e soja:.....	45
2.11.1 Benefícios econômicos do MIP: o exemplo da soja no Paraná	46
2.11.2 Capacitação em MIP-Soja pelo SENAR-PR	49
2.11.2 Soluções para monitoramento	50
2.12 Desafios do controle biológico no Brasil	54
2.12.1 Desafios com os macrorganismos (parasitoides e predadores)	55

2.12.2 Desafios com os microrganismos (entomopatógenos)	55
3. METODOLOGIA.....	57
3.1 Etapas da coleta de dados.....	58
3.2 Análise de dados (delineamento).....	59
3.2 Propostas com possíveis soluções	60
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	60
4.1 Benefícios da biotecnologia	60
4.2 Impactos econômicos e socioambientais, se houver perda da tecnologia Bt ..	61
4.3 Ecossistema de inovação	64
4.3.1 Internet das coisas e o monitoramento de pragas	65
4.3.2 O uso de drones em agricultura de precisão	67
4.3.3 Controle biológico e MIP.....	67
4.4 Resistência em algodão, milho e soja GM com tecnologias Bt.....	69
4.4.1 Ocorrências em algodão.....	69
4.4.2 Ocorrências em milho.....	70
4.4.3 Ocorrências em soja.....	70
4.5 Taxa de adoção das áreas de refúgio agrícola	71
4.5.1 Razões para a baixa adoção do refúgio agrícola.....	72
4.5.2 Entendimento e conscientização sobre refúgio agrícola.....	73
4.6 Mapeamento das soluções de controle biológico.....	74
4.7 Aspectos econômicos, operacionais e técnicos das soluções de CB	75
4.7.1 Aspectos econômicos	75
4.7.2 Aspectos operacionais.....	77
4.7.3 Aspectos técnicos	81
4.8 Boas práticas agrícolas.....	83
4.9 Nova abordagem nas ações educativas (BPA).....	85
4.10 Desafios e oportunidades no uso de CB na estratégia de MRI.....	86
4.11 Propostas com possíveis soluções	89
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
REFERÊNCIAS.....	95

1. INTRODUÇÃO

Em 2021, o Valor Bruto da Produção Agropecuária (VBP) atingiu R\$1,129 trilhão, com destaque para os resultados nas lavouras de soja (R\$ 366 bilhões); milho (R\$ 125,2 bilhões) e algodão (R\$ 27,6 bilhões) (MAPA, 2022)¹, dando conta da importância econômica dessas culturas para o Brasil.

Entre os indicadores mais ilustrativos da trajetória recente da agricultura brasileira estão os números de produção e os índices de produtividade de algodão (*Gossypium* spp.), milho (*Zea mays*) e soja (*Glycine max*). Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na safra 2020/2021, revelam que as culturas de algodão, milho e soja foram, conjuntamente, responsáveis pelo uso de mais de 60,2 milhões de hectares (mais de 87,3% das áreas destinadas para produção de grãos e cereais no Brasil), produzindo mais de 227 milhões de toneladas (o que equivale a mais de 90% da produção nacional de grãos), considerando-se as safras de verão e de inverno (CONAB, 2022). A série histórica registra que entre a safra 1976/1977 e a safra 2020/2021 a área plantada com algodão, milho e soja cresceu de 22,8 milhões para 60,2 milhões de hectares (+264%), enquanto a produção aumentou praticamente em sete vezes, de 32,6 para 227,8 milhões de toneladas.

Com abundância de recursos naturais, como terra arável e recursos hídricos, os fatores que restringiam o desbloqueio potencial de produção agrícola no Brasil eram capital humano, crédito rural e disponibilidade de tecnologias agrícolas adaptadas ao clima e às condições do solo locais (CHADDAD, 2017). Dentre as tecnologias agrícolas que mais contribuem para o aumento da produtividade agrícola, esse estudo destaca a biotecnologia, as sementes geneticamente melhoradas, os defensivos agrícolas químicos e os produtos biológicos.

Com a introdução de biotecnologias combinadas em 2007 (plantas tolerantes a herbicidas com tecnologia Bt (*Bacillus thuringiensis* Berliner) para o manejo das principais lagartas), solução que proporciona uma melhor proteção às plantas e a

¹ Levantamento realizado pela Secretaria de Política Agrícola do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). O VBP mostra a evolução do desempenho das lavouras e da pecuária no decorrer do ano, correspondente ao faturamento dentro do estabelecimento. É calculado com base na produção agrícola e pecuária e nos preços recebidos pelos produtores nas principais praças do país dos 26 maiores produtos agropecuários nacionais. O valor real da produção é obtido, descontada da inflação, pelo Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna (IGP-DI), da Fundação Getúlio Vargas (FGV). Disponível em <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/valor-da-producao-agropecuaria-de-2021-atinge-r-1-129-trilhao>. Acesso em 14/01/2022.

redução das perdas de produtividade, houve uma rápida adoção das biotecnologias e a área plantada com algodão, milho e soja Geneticamente Modificadas (GM) no Brasil em 2020 somou mais de 52 milhões de hectares.

A eficácia e a praticidade proporcionadas pelas plantas GM de algodão, milho e soja com tecnologias Bt levaram os agricultores à utilização massiva da tecnologia, aumentando substancialmente a pressão de seleção de lagartas resistentes. O uso intensivo de plantas com tecnologia Bt sem o uso adequado das áreas de refúgio agrícola², assim como de outras boas práticas para o Manejo Integrado de Pragas (MIP), está contribuindo para o aumento dos casos de resistência das lagartas às plantas GM com tecnologia Bt no Brasil, colocando em risco a sustentabilidade da tecnologia. A perda de eficácia agrônômica tende a refletir no desempenho das lavouras (com a queda do diferencial de produtividade) e também no manejo de importantes pragas-alvo (com aplicação de mais inseticidas). Em um cenário de aumento da população de insetos resistentes não controlados pelas plantas GM com tecnologia Bt, os benefícios econômicos e socioambientais proporcionados pela tecnologia diminuirão com o passar do tempo e poderão até mesmo ser perdidos.

Esse trabalho se propõe a avaliar a situação atual, os principais desafios e oportunidades do Controle Biológico (CB) ser utilizado no Manejo de Resistências a Inseticidas (MRI) em plantas GM de algodão, milho e soja com proteínas Bt, contribuindo para maior longevidade e, portanto, sustentabilidade da tecnologia Bt no Brasil.

O CB é definido como um fenômeno natural que consiste na regulação de plantas e animais por inimigos naturais e que seriam agentes de mortalidade biótica (PARRA et al., 2021). O mercado global de CB tem crescido a uma taxa de 14,4% ao ano. No Brasil, em 2020, o crescimento foi de 30%, ou seja, mais que o dobro do mercado mundial (Consultoria Blink, 2021)³. Embora possa ser utilizado isoladamente, o CB tem sido empregado como um componente do Manejo Integrado de Pragas

² A área de refúgio agrícola consiste na semeadura de um determinado percentual de sementes sem a tecnologia Bt, em área vizinha onde são cultivadas lavouras GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt, com o objetivo de evitar ou retardar a ocorrência de resistência de insetos-praga às plantas com proteínas Bt. Boas Práticas Agrônômicas (2022). Refúgio Agrícola. Disponível em <https://boaspraticasagronomicas.com.br/boas-praticas/refugio-agricola/> Acesso em 28/01/2022.

³ CropLife Brasil: Cresce a adoção de produtos biológicos pelos agricultores brasileiros. Disponível em <https://croplifebrasil.org/noticias/cresce-a-adocao-de-produtos-biologicos-pelos-agricultores-brasileiros/> Acesso em 20/01/2022.

(MIP), definido por Kogan (1998), e que pode ser simplificado como “um conjunto de medidas (estratégias ou táticas) que visam manter as pragas abaixo do nível de dano econômico, levando-se em conta critérios econômicos, ecológicos e sociais” (PARRA et al., 2021).

Ao analisar se as atuais soluções de CB de pragas agrícolas têm oportunidades para fazer parte do conjunto de táticas integradas para o manejo de resistências das principais lagartas às tecnologias Bt, a pesquisa levanta hipóteses e analisa alternativas que possam gerar propostas e contribuir com o conjunto de Boas Práticas Agrícolas (BPA), atuando em linha com as orientações técnicas do Grupo de Biotecnologia (GBio) do Comitê Brasileiro de Ação à Resistência (IRAC-BR, 2016)⁴.

As premissas para definir o estudo se encaixam na nova visão de bioeconomia e na teoria sobre o desenvolvimento e o uso sustentável da diversidade biológica e da agricultura digital para o controle de pragas e doenças nas lavouras. O portfólio de produtos biológicos contempla tecnologias produzidas a partir agentes microbiológicos (ácaros, insetos e nematoides), microbiológicos (vírus, bactérias e fungos), semioquímicos (feromônios) e bioquímicos (hormônios), que são considerados exemplos de ativos biológicos e fazem parte da formulação de diferentes produtos biológicos já registrados no Brasil, que estão se tornando cada vez mais relevantes para as estratégias de manejo fitossanitário nas lavouras.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cultivos de algodão, milho e soja no Brasil

O algodão é um produto agrícola de grande relevância socioeconômica para o Brasil, pois além de ser a mais importante fonte natural de fibras, coloca o país entre os cinco maiores produtores mundiais, ao lado de China, Índia, Estados Unidos da América (EUA) e Paquistão. O milho e a soja são “commodities” de grande importância na alimentação humana e animal, além da produção de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, respectivamente, sendo importantes matérias-primas para a agroindústria.

⁴ IRAC-BR/GBio (2016). Orientação Técnica: Resultados sobre a efetividade das áreas de refúgio para culturas *Bt* no Brasil. Disponível em <https://www.illac-br.org/gbio>. Acesso em 10/02/2022.

Em estudo elaborado pela Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas (SIRE)⁵ da Embrapa, entre 2000 e 2020, o Brasil foi o segundo maior produtor e exportador de soja. A partir de 2020, alcançou o primeiro lugar, com 126 milhões de toneladas produzidas e 84 milhões exportadas. O país responde hoje por 50% do comércio mundial de soja. As exportações brasileiras do grão somaram US\$30 bilhões, em 2020, e US\$346 bilhões nas duas últimas décadas. O Brasil ocupou, em 2020, a terceira posição na produção mundial de milho, com 100 milhões de toneladas (8,2% do total mundial), superado apenas pelos EUA e pela China. Nesse ano, o milho alcançou o segundo lugar na lista dos grãos mais exportados, com 38 milhões toneladas, ou seja, 19,8% das exportações totais do produto, atrás apenas dos EUA, representando US\$6 bilhões de dividendos ao país. Com relação ao algodão, em 2020, o país foi o quarto maior produtor, com 5,3 milhões de toneladas (7,2%), e o segundo maior exportador, com cerca de US\$2 bilhões (14,3%), atrás apenas dos EUA (38,6%) (EMBRAPA, 2021).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na safra passada, o Brasil produziu 3.434,4 mil toneladas de caroço de algodão ou 2.355,7 mil toneladas de algodão em pluma. A produção das lavouras de milho foi de 87 milhões de toneladas e a de soja foi recorde, com 137,3 milhões de toneladas (CONAB, 2022). A área plantada com algodão, milho e soja, em 2021, ultrapassou 60 milhões de hectares, o que corresponde a mais de 87% da área de grãos no país (CONAB, 2022).

Em estudo realizado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2020), as projeções para o algodão em pluma indicam a produção de 3,8 milhões de toneladas na safra 2029/30, contra 2,9 milhões de toneladas na safra 2019/20. Essa expansão corresponde a uma taxa de crescimento de 3,4% ao ano durante o período da projeção e a uma variação de 32,0% na produção. Com relação ao milho, para a safra 2029/30 a produção projetada é de 123,9 milhões de toneladas, podendo chegar a 150,8 milhões de toneladas, contra uma produção de 102,3 milhões de toneladas na safra 2019/20, ou seja, o crescimento pode atingir 47,4%. A produção de soja na safra 2029/30 está projetada em 156,5 milhões de toneladas. Esse número

⁵ Os dados foram obtidos pela EMBRAPA (SIRE) a partir da plataforma FAOSTAT, da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) para o período de 2000 a 2020. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>. Acesso em 27/09/2021.

representa um acréscimo de 30,1% em relação à produção da safra 2019/20, que foi de 120,33 milhões de toneladas (CONAB, 2020).

2.2 Impacto das perdas causadas por pragas nas lavouras

Como o modelo de agricultura praticado no Brasil é tropical, a sucessão de cultivos e as condições edafoclimáticas contribuem para que a proliferação de pragas, doenças e plantas daninhas ocorra com maior intensidade, quando comparado ao modelo de agricultura praticado em países de clima temperado. Nas principais regiões produtoras, chega-se à colher até três safras por ano, com sobreposição de plantios, que resultam na oferta ininterrupta de alimentos para os insetos herbívoros. Nas lavouras de algodão, milho e soja, as lagartas desfolhadoras migram facilmente entre as culturas, como é o caso da lagarta falsa-medideira-da-soja (*C. includens*), que também é uma praga desfolhadora de algodão. A lagarta-do-cartucho (*S. frugiperda*) é praga do milho, mas também ataca o algodão e a soja. Da mesma forma, a *H. armigera* ataca o algodão, o milho e a soja (FONTES; VALADARES, 2020). Com a expansão e a intensificação das lavouras de grãos, o manejo sustentável se faz necessário, para garantir as exigências do mercado e a viabilidade econômica para os produtores (GAZZONI, 2013). Somente no Brasil, as lagartas que se alimentam das plantas cultivadas causam perdas de produtividade e custos para o manejo estimados em US\$1 bilhão por ano (FIGUEIREDO et al., 2005; JEGER et al., 2017).

Devido ao impacto das mudanças climáticas, dentre alguns outros fatores, as pragas que devastam plantações economicamente importantes estão se tornando mais destrutivas e representando uma ameaça crescente à segurança alimentar e ao meio ambiente. De acordo com a FAO⁶, órgão das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, estima-se que 40% da produção agrícola global é perdida devido ao ataque de pragas. A cada ano, as doenças das plantas custam à economia global mais de US\$220 bilhões e os insetos invasores, pelo menos, US\$70 bilhões (FAO, 2021).

⁶ Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO). Scientific review of the impact of climate change on plant pests. Disponível em <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb4769en> Acesso em 08/01/2022.

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)⁷, que realizou a revisão científica do impacto das mudanças climáticas na saúde das plantas, concluiu que, em muitos casos, a mudança climática resultará em problemas crescentes relacionados com a fitossanidade em ecossistemas manejados (por exemplo, agricultura, horticultura e silvicultura), semi-manejados (por exemplo, parques nacionais) e presumivelmente também nos não manejados. Ajustes nas estratégias de proteção de plantas já são necessários atualmente, devido às recentes mudanças climáticas, e novos ajustes serão ainda mais cruciais no futuro, assumindo que os cenários projetados de mudanças climáticas se tornem realidade (IPCC SECRETARIAT, 2021).

Estimativas precisas das perdas agrícolas causadas por insetos são difíceis de serem obtidas, pois os danos causados por esses organismos dependem de uma série de fatores relacionados às condições ambientais, às espécies vegetais cultivadas, às condições socioeconômicas dos agricultores e ao nível de tecnologia utilizado. No Brasil, dados sobre perdas agrícolas causadas por insetos são extremamente escassos e dispersos na literatura científica. As estimativas de perdas nas culturas devido aos danos causados por insetos são importantes no MIP. Essas estimativas também são usadas para decidir onde alocar o financiamento da pesquisa e determinar a importância relativa desses organismos em relação à agricultura e ao meio ambiente. Os danos causados por invertebrados são responsáveis por 10 a 15% da produção agrícola, custando aproximadamente US\$17,7 bilhões por ano no Brasil (OLIVEIRA, AUAD, MENDES e FRIZZAS, 2014).

O Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada da Universidade de São Paulo (CEPEA/ESALQ/USP) avaliou o impacto que o controle de pragas e doenças da soja e do milho exerce sobre os preços ao consumidor. A falta de controle pode gerar perdas de produtividade de 6,6 a 40% nas duas culturas, afetando os preços de toda a cadeia até o produto final, que vai para a mesa do consumidor (CEPEA, 2019)⁸.

⁷ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

⁸ O CEPEA (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada), da ESALQ/ USP, em parceria com a ANDEF (Associação Nacional de Defesa Vegetal), monitorou a evolução da ocorrência das principais pragas e doenças que atingiram as culturas de soja, milho e algodão nas safras 2014/15, 2015/16 e 2016/17 e os respectivos impactos econômicos para produtores e para o País. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_EstudoPragaseDoencas_Parte%201.pdf. Acesso em 27/09/2021.

Das pragas-alvo de controle de plantas Bt, *S. frugiperda*, *C. includens* e *H. armigera* são apontadas como as espécies de insetos-praga que apresentam maior risco de ocorrência de resistência, devido ao histórico de evolução de resistência a inseticidas e proteínas Bt em outros países e no Brasil (BERNARDI et al., 2016). Com base no histórico de evolução de resistência identificada pelos autores citados, foram reunidas, com base na literatura, mais informações sobre as características e os impactos de *S. frugiperda*, *C. includens* e *H. armigera*, que serão discutidas nos subitens a seguir.

2.2.1 Lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*)

S. frugiperda é uma praga altamente polífaga, que se alimenta em mais de 80 espécies de plantas, entre elas importantes culturas como soja, sorgo, milho, feijão, algodão e solanáceas (CRUZ et al., 2010). A lagarta-do-cartucho, *S. frugiperda*, é a principal praga da cultura do milho em condições de campo no Brasil, podendo reduzir a produtividade em até 34% (VALICENTE, 1991). Pode causar perdas de 17 a 38,7% na produção, tanto no milho como no sorgo, dependendo do ambiente, da cultivar e, principalmente, do estágio de desenvolvimento e estado nutricional das plantas atacadas (CARVALHO, 1970; CRUZ & TURPIN, 1983; WILLIAMS & DAVIS, 1990; CORTEZ & WAQUIL, 1997; CRUZ et al. 1999).

Nativa das regiões tropicais e subtropicais das Américas (SILVA et al., 1968), a lagarta-do-cartucho do milho foi relatada pela primeira vez na África subsaariana em 2016 (GOERGEN et al., 2016). Em 2018, começou a se espalhar no subcontinente indiano, Ásia e partes da Oceania. Até outubro de 2019, *S. frugiperda* foi confirmada em vários outros países da Ásia e em 2020 na Austrália. A partir de abril de 2021, está presente nas Ilhas Canárias na Europa e outras regiões do Pacífico. Até o momento, a lagarta-do-cartucho se espalhou para mais de 70 países (FAO, 2021).

O inseto está entre as pragas transfronteiriças mais destrutivas. Os invasores vorazes se alimentam em grande número das folhas, caules, flores e frutos de mais de 350 espécies de plantas, incluindo culturas como milho, algodão, arroz e sorgo, sendo o milho a planta hospedeira preferida. Para o manejo dessa praga, são recomendadas várias estratégias, incluindo métodos culturais, biológicos e químicos (WAQUIL; VILLELA; FOSTER, 2002).

2.2.2 Lagarta falsa-medideira (*C. includens*)

A lagarta *C. includens*, conhecida popularmente como falsa-medideira, devido a sua locomoção ser do tipo "mede palmo", pertence à família Noctuidae e subfamília Plusiinae. Por vários anos, essa espécie foi denominada como *Pseudoplusia includens*; no entanto, com o avanço da biologia molecular, sua classificação foi reavaliada e alterada para *C. includens* (GOATER et al., 2003; SOSA-GÓMEZ et al., 2014). As lagartas do complexo Plusiinae, comumente denominadas falsas-medideiras, constituem um complexo de espécies associado à soja, sendo *C. includens* a espécie mais importante, seguida de *Rachiplusia nu* (MORAES et al., 1991).

No Brasil, até meados da safra 2003/2004, *C. includens* era considerada uma praga secundária na cultura da soja, pois era controlada naturalmente por parasitoides, predadores e, principalmente, por fungos entomopatogênicos (SOSA-GÓMEZ et al., 2010). A importância dessa espécie como praga principal da cultura veio à tona com seus frequentes surtos populacionais, em decorrência do uso incorreto de produtos químicos. Com o aumento do plantio direto, a maioria dos produtores, quando aplica herbicidas pós-emergentes na soja, logo no início do desenvolvimento da cultura, tem utilizado a técnica de misturas com herbicidas, ou inseticidas de amplo espectro de ação, como os piretroides, afetando todo o complexo de inimigos naturais presentes na cultura, desencadeando surtos de altas populações de insetos, como de *C. includens*, em várias regiões, demandando muitas aplicações de inseticidas de amplo espectro na cultura, impossibilitando, em muitos casos, o uso de inseticidas biológicos a base de um Baculovírus (AgMVPN) contra a lagarta-da-soja. Além disso, a aplicação de fungicidas não seletivos, especialmente para o controle do fungo *Phakopsora pachyrhizi*, causador da ferrugem-asiática, prejudicou o desenvolvimento do fungo entomopatogênico *Nomuraea rileyi*, de ocorrência natural e que ajuda na manutenção da população de lagartas falsa-medideiras em campo (SOSA-GÓMEZ et al., 2010). O problema se agravou ainda mais quando os agricultores passaram a misturar inseticidas com fungicidas para o controle da ferrugem-asiática, visando ao aproveitamento da operação para controlar percevejos. A mistura com inseticidas nessa fase da cultura contribuiu para a eliminação de predadores e parasitoides dos percevejos, gerando ainda mais desequilíbrios (MOSCARDI, 2008).

Devido ao hábito das lagartas de *C. includens* permanecerem, preferencialmente, na porção inferior das plantas de soja, a calda inseticida pulverizada sobre as plantas dificilmente consegue atingi-las (CARVALHO et al., 2012; ZULIN et al., 2018). Diante da preocupação relacionada ao aumento populacional e, conseqüentemente, aos severos danos provocados pela lagarta falsa-medideira na cultura da soja, medidas de controle focadas no MIP são consideradas indispensáveis (BOTELHO et al., 2018).

C. includens também é uma lagarta desfolhadora de importância crescente no algodão, pois esta cultura é geralmente cultivada após a soja, de onde as mariposas se dispersam para causar infestações (SANTOS, 2011). Considerando as características do sistema de produção de grãos em região tropical, com condições edafoclimáticas favoráveis a produção de duas ou três safras no mesmo ano, pode determinar fluxos contínuos de insetos pragas, além de um ambiente favorável para a pressão de seleção, e por sua vez, a ocorrência de resistência de insetos às plantas com tecnologia Bt.

2.2.3 *H. armigera*

H. armigera é uma espécie extremamente polífaga, cujas lagartas foram registradas em mais de 60 espécies de plantas cultivadas e silvestres e em cerca de 67 famílias hospedeiras, incluindo Asteraceae, Fabaceae, Malvaceae, Poaceae e Solanaceae (ZALUCKI et al., 1986; FITT, 1989; POGUE, 2004), podendo causar danos às diferentes culturas de importância econômica, como o algodão, leguminosas em geral, sorgo, milho, tomate, plantas ornamentais e fruteiras (REED, 1965; FITT, 1989; MORAL GARCIA, 2006).

A lagarta do algodão do velho mundo *H. armigera* é a praga mais significativa e impactante da agricultura na Ásia, Europa, África e Austrália, causando danos às lavouras estimados em mais de US\$2 bilhões anualmente, excluindo os custos socioeconômicos e ambientais associados ao seu controle. Nas safras 2011/2012 e 2012/2013, altas infestações de larvas da espécie *Helicoverpa* foram detectadas em diferentes regiões do Brasil, atacando cultivos extensivos e forrageiras, resultando em perdas econômicas significativas (TAY et al., 2013).

Considerando as táticas de controle aplicadas em outros países, é possível recomendar o uso de armadilhas iscadas com os feromônios sexuais da praga; cultivares resistentes, Bt ou convencionais; destruição de restos de culturas; liberação de inimigos naturais, como, por exemplo, *Trichogramma* spp., que está intimamente associado a *H. armigera*; e, finalmente, inseticidas seletivos, para manter os inimigos naturais nas áreas agrícolas. Mas também é fundamental alternar inseticidas com diferentes modos de ação, para reduzir a pressão seletiva exercida pelos ingredientes ativos, uma vez que a praga apresenta grande potencial biótico de desenvolver resistência (McCAFFERY et al., 1986; KING & COLEMAN, 1989; DURAIMURUGAN & REGUPATHY, 2005; KUMAR et al., 2009).

2.3 A tecnologia Bt e a importância para o algodão, milho e soja

Bacillus thuringiensis Berliner (Bt) é uma bactéria gram-positiva e entomopatogênica, naturalmente encontrada no solo e que é a fonte dos genes de resistência nas chamadas plantas-Bt, produzidas comercialmente (BOBROWSKI, 2003). No momento de sua esporulação, *B. thuringiensis* produz inclusões proteicas cristalinas conhecidas como delta endotoxinas, as quais são altamente específicas aos seus insetos-alvo, inofensivas ao ser humano, aos vertebrados e às plantas e têm efeito não poluente ao meio ambiente, por serem completamente biodegradáveis (BRAVO et al., 2005).

Nos anos que se seguiram à sua descoberta, no início do século XX, *Bacillus thuringiensis* (Bt) recebeu pouca atenção pelos microbiologistas e entomologistas. Entretanto, após a descoberta de sua atividade entomopatogênica, ele passou a ser estudado por enorme quantidade de cientistas das mais diversas disciplinas, que exploraram seus segredos em nível molecular, fisiológico e ecológico. Hoje, Bt é o inseticida microbiano mais bem-sucedido, aplicado na proteção de grãos, florestas e no combate a vetores de doenças aos humanos. A atividade entomopatogênica desta bactéria é decorrente da produção de cristais proteicos em concomitância com o processo de esporulação. Esses cristais são formados por polipeptídios conhecidos como proteínas Cry que apresentam propriedades entomopatogênicas frente a insetos das Ordens Lepidoptera, Diptera,

Coleoptera, Hymenoptera, Homoptera, Dictyoptera, Orthoptera, Mallophaga, além de nematoides (Strongylida, Tylenchida), protozoários (Diplomonadida) e ácaros (Acari). (CAPALBO, 2005).

Plantas geneticamente modificadas (GM) resistentes a insetos representam um novo método de controle de insetos-praga para programa de MIP em diversos agroecossistemas (BERNARDI, 2012). Nas plantas de algodão, milho e soja geneticamente modificadas com tecnologia Bt, um gene específico dessa bactéria é introduzido no genoma da planta, auxiliando no manejo de pragas e, conseqüentemente, preservando o potencial produtivo das lavouras. Os insetos-praga, ao ingerirem a planta Bt, ativam a proteína, ligando-a a um receptor específico nas células de seus intestinos. Isso ocasiona a morte das pragas (CROPLIFE BRASIL, 2021)⁹.

Os cristais proteicos produzidos pelas bactérias Bt, compostos principalmente por δ -endotoxinas, são conhecidos como proteínas Cry. Atualmente são conhecidos 74 grupos de toxinas Cry, identificadas por letras e números (Cry1A, Cry2Ae), as quais possuem ação inseticida contra insetos pertencentes a diversas Ordens, mas principalmente Coleoptera, Diptera, Hymenoptera e Lepidoptera. Além disso, outras proteínas com atividade inseticida também são produzidas pela bactéria *B. thuringiensis*, entretanto, em menor frequência, sendo elas as proteínas Vip e Cyt (BALLERINI et al., 2017).

Desde que o primeiro gene de uma proteína Bt foi sequenciado em 1981, 993 genes que codificam toxinas Bt¹⁰ foram identificados, incluindo 801 genes Cry, 40 genes Cyt e 152 genes Vip (PENG, 2019). Uma das estratégias de manejo da resistência de insetos utilizadas pelas empresas é a piramidação de genes, quando a utiliza a expressão de duas ou mais proteínas de Bt na mesma planta, como pode ser verificado na Tabela 1.

⁹ CropLife Brasil (2021). O que são e para que servem as plantas Bt. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/perguntas-frequentes/o-que-sao-e-para-que-servem-as-plantas-bt/>. Acesso em: 25/09/2021.

¹⁰ The Bacillus thuringiensis delta-endotoxin nomenclature committee. Disponível em http://www.lifesci.sussex.ac.uk/home/Neil_Crickmore/Bt/. Acesso em: 13/02/2022

Tabela 1: Proteínas Bt disponíveis no mercado brasileiro (CTNBio, 2020).

ALGODÃO	MILHO	SOJA
Cry1Ac	Cry1Ab	Cry1Ac
Cry1Ac/Cry1F	Cry1F	Cry1Ac/Cry1F
Cry1Ac/Cry2Ab2	VIP3A	Cry1Ac/Cry1A.105/Cry2Ab2
Cry1Ab/CryAe	Cry1Ab/Cry1F	
Cry1Ac/Cry1F/VIP3A	Cry1A.105/Cry2Ab2	
Cry1Ac/Cry2Ab2/VIP3A	Cry1Ab/Cry1F/VIP3A	
Cry1Ab/Cry2Ae/VIP3A	Cry1A.105/Cry2Ab2/VIP3A	
	Cry1F/Cry1A.105/Cry2Ab2/VIP3A	

2.4 Adoção da biotecnologia no algodão, milho e soja

Com a introdução de biotecnologias combinadas em 2007 (plantas tolerantes a herbicida e para o manejo de insetos-praga), que proporcionou uma melhor proteção à planta e redução das perdas de produtividade, foi possível diminuir as aplicações de inseticidas, assim como os gastos com combustível e água. A rápida adoção das tecnologias transgênicas combinadas no Brasil revelou o quanto os produtores identificaram tais benefícios. A área plantada com transgênicos no Brasil em 2020 somou mais de 52,8 milhões de hectares divididos entre as culturas do algodão milho, soja e cana-de-açúcar, cujo plantio começou em 2018. De acordo com o Serviço Internacional para Aquisição de Aplicações de Agrobiotecnologia (ISAAA, 2019), o Brasil cultivou 52,8 milhões de hectares com culturas transgênicas, onde 35,1 milhões de hectares é com soja (superando a área de soja dos EUA, pela primeira vez), 16,3 milhões de hectares de milho, 1,4 milhão de hectares de algodão e cerca de 18 mil hectares de cana-de-açúcar resistente a insetos, registrando um crescimento de aproximadamente 1,6 milhão hectares ou 3% em relação a 2018. Dados sobre a adoção de transgênicos no Brasil em 2020, indicam que taxa no algodão é 99%, milho 91% (verão e inverno) e soja 98% (CELERES, ISAAA, SPARK, 2020)¹¹.

¹¹ Celeres, ISAAA, Spark (2020) – Disponível em <https://croplifebrasil.org/noticias/plantas-transgenicas-no-brasil/> Acesso em 15/01/2022.

2.5 A evolução da resistência de insetos à tecnologia Bt

De acordo com o Insecticide Resistance Action Committee (IRAC)¹², a resistência pode ser definida como "uma mudança hereditária na sensibilidade de uma população de praga que se reflete na falha repetida de uma substância inseticida em atingir o nível de controle esperado quando usado de acordo com a recomendação do rótulo para essa espécie de praga". A resistência a inseticidas é um exemplo de mudança evolutiva, o inseticida atuando como uma poderosa "peneira seletiva" para concentrar mutantes resistentes que estavam presentes em baixas frequências nas populações originais (CROW, 1957).

Para documentar a resistência, deve-se mostrar que tratamentos repetidos com um inseticida causaram um aumento significativo na quantidade de inseticida necessário para matar uma certa proporção de uma população (por exemplo, a concentração que mata 50%, CL₅₀) ou uma diminuição significativa na porcentagem de mortalidade causada por uma quantidade fixa de inseticida. Pode-se demonstrar resistência diretamente, indicando decréscimos na suscetibilidade ao longo do tempo dentro de uma população, ou indiretamente, mostrando que uma população com histórico de alta exposição a um inseticida é menos suscetível do que populações coespecíficas que tiveram menos exposição (TABASHNIK, 1994).

A resistência cruzada refere-se aos casos em que um único mecanismo de resistência confere resistência a duas ou mais proteínas inseticidas — proteínas geralmente com mesmo sítio de ação (por exemplo, Cry1Ab e Cry1F e Cry1A.105 em *S. frugiperda*). Claramente, como as populações de insetos-praga são geralmente grandes em quantidade e se reproduzem rapidamente, há sempre o risco de que a resistência aos inseticidas possa evoluir, especialmente quando esses produtos são mal utilizados ou excessivamente utilizados.

A evolução da resistência consiste na seleção de indivíduos resistentes e no aumento da frequência desses indivíduos na população da praga, limitando a eficiência das tecnologias no manejo das pragas (OMOTO e BERNARDI, 2015). A pressão contínua de seleção é a causa determinante na ocorrência da resistência. Pode-se classificar como um caso típico de seleção Darwiniana, onde o uso contínuo

¹² Insecticide Resistance Action Committee (IRAC). Disponível em <https://irac-online.org/about/resistance/>. Acesso em 26/09/2021

de um inseticida com o mesmo modo de ação aumenta a frequência relativa de indivíduos naturalmente resistentes presentes na população de determinado inseto-praga (GEORGHIOU, 1983).

Na China, a resistência de insetos-praga a inseticidas químicos foi um dos fatores responsáveis pelo surto de *H. armigera* no início dos anos 1990, indicando que o problema de manejo de pragas resistentes a inseticidas é um fenômeno global. Quando o algodão Bt foi adotado na China em 1997, proporcionou o controle eficaz da *H. armigera* e, ao mesmo tempo, contribuiu para a redução no uso de inseticidas químicos para o controle do inseto-praga (YIHUA; YAPENG; YIDONG, 2013). A preocupação dos pesquisadores chineses foi saber quais inseticidas químicos ainda poderiam ser utilizados para o controle fitossanitário de *H. armigera*, caso a lagarta se tornasse resistente às plantas de algodão Bt. A evolução da resistência de insetos-praga às culturas GM com proteínas inseticidas Bt é um risco ambiental significativo que pode afetar vários públicos interessados, incluindo aqueles fora da agricultura (ANDOW, 2008).

No caso específico da tecnologia Bt, as lagartas resistentes podem sobreviver se alimentando das plantas de algodão, milho ou soja GM e transmitir o gene de resistência para as gerações futuras. A eficácia e a praticidade proporcionada pelas plantas GM de algodão, milho e soja com tecnologias Bt estão levando os agricultores a utilização massiva da tecnologia, aumentando de forma constante a pressão de seleção com a mesma tática, ou seja, o controle com proteínas Bt, propiciando a sobrevivência de insetos que possuíam naturalmente alelos de resistência.

Sem a adoção das áreas de refúgio agrícola em conformidade, juntamente com outras táticas integradas de MRI, a resistência em uma determinada praga-alvo pode ocorrer para duas ou mais proteínas Bt devido à resistência cruzada ou resistência múltipla. Por outro lado, a resistência múltipla ocorre quando pelo menos dois diferentes mecanismos de resistência coexistentes conferem resistência a duas ou mais proteínas Bt, com modo de ação distinto (por exemplo, Cry1F, Cry2Ab2 e Vip3Aa20). Esse processo, com o passar das gerações da praga sobre pressão de seleção, aumenta a frequência de resistentes e, conseqüentemente, reduz a eficiência de controle das plantas Bt, se estratégias de MRI não forem efetivamente implementadas.

2.6 Estratégias de Manejo de Resistência a Inseticidas (MRI)

Evitar ou retardar o processo de estabelecimento de populações resistentes a uma cultura GM é uma etapa crítica para maximizar a durabilidade e, portanto, a sustentabilidade da tecnologia (GOULD; TABASHNIK, 1998). A resistência de insetos às plantas GM tem muito em comum com a resistência de insetos a inseticidas. O manejo da resistência inclui a aplicação de múltiplas toxinas em mistura ou em sequência, o uso de altas doses de proteína inseticida para tornar a expressão dos alelos de resistência mais recessiva e a distribuição intercalada de áreas com plantas Bt com áreas de refúgio agrícola (não-Bt) (PICHULO; TAKAHASHI, 1976; KINK; VIRGO; MAO, 1978; KING; PREWIT, 1982; ALSTAD; ANDOW, 1995).

2.6.1 Refúgio agrícola

A área de refúgio agrícola consiste na semeadura de um determinado percentual de sementes sem a tecnologia Bt (não-Bt) de algodão (20%), milho (10%) e soja (20%), em área vizinha onde são cultivadas lavouras GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt. As plantas de algodão, milho e soja do refúgio (não Bt), devem ser da mesma espécie da lavoura GM com tecnologia Bt e possuir porte e ciclo semelhante às variedades Bt. Também é importante que o agricultor tenha no planejamento da safra quais serão as sementes não-Bt que irá usar nas áreas de refúgio. Nessas áreas, determinada parcela da população de insetos-praga suscetíveis (SS) não é exposta a pressão de seleção, podendo sobreviver, reproduzir e acasalar com indivíduos sobreviventes resistentes (RR) das áreas cultivadas com plantas GM com proteínas Bt, gerando descendentes heterozigotos (RS) que continuarão sendo suscetíveis à tecnologia Bt. O objetivo é evitar ou retardar a ocorrência da resistência dos insetos-praga às proteínas inseticidas expressas pelas culturas com tecnologia Bt (BERNARDI et al., 2011 p.10).

A estratégia de refúgio agrícola em cultivos GM com proteínas inseticidas Bt é obrigatória nos EUA e em outros países (TABASHNIK, 2008), com o objetivo de

orientar e disciplinar a implementação de estratégias de MRI em plantas GM com tecnologia Bt (EPA, 2021)¹³.

2.6.2 Conceito de alta dose/refúgio

Entende-se por alta dose a expressão da proteína inseticida em concentração de pelo menos 25 vezes a que seria necessária para matar 99% de uma população suscetível de referência. Uma baixa dose é qualquer quantidade que não atenda a definição de alta dose (TABASHNIK, 1994; CAPRIO; SUMMEFORD; SIMS, 2000).

A peça-chave no manejo da resistência para cultivos GM é a estratégia de alta dose/refúgio, a abordagem mais recomendada nos diversos países. Na estratégia de alta dose/refúgio, uma parte da população alvo da praga é exposta a altas concentrações (altas doses) de toxinas produzidas por culturas GM com tecnologia Bt, tornando a resistência funcionalmente recessiva. Quando a herança da resistência é recessiva, apenas indivíduos homozigotos resistentes (genótipo RR) sobrevivem em cultivos GM com tecnologia Bt. Outra proporção da população da praga é mantida em refúgios próximos de plantas hospedeiras não-Bt, fornecendo um reservatório de alelos suscetíveis (dos genótipos RS e SS). Se a frequência do alelo de resistência for baixa, as pragas resistentes aos homozigotos que sobrevivem em culturas GM com tecnologia Bt serão relativamente raras, enquanto as pragas suscetíveis serão abundantes e prontamente disponíveis para acasalar com indivíduos resistentes. A progênie de tais acasalamentos será heterozigota para alelos de resistência e fenotipicamente suscetível a cultivos de alta dose de Bt, dificultando assim a evolução da resistência. Modelos teóricos e observações empíricas mostraram que a estratégia de alta dose/refúgio é uma abordagem eficaz para evitar ou retardar o desenvolvimento de resistência quando implantadas conforme descrito acima (ALSTAD; ANDOW, 1995; GOULD, 1998; CAPRIO et al., 2004; ALPHEY et al., 2008; TYUTYUNOV et al. 2008; HUTCHISON et al., 2010; HUANG et al., 2011; GRYSPEIRT; GREGOIRE, 2012).

¹³ EPA (2021). Insect Resistance Management for Bt Plant-Incorporated Protectants. Disponível em <https://www.epa.gov/regulation-biotechnology-under-tsca-and-fifra/insect-resistance-management-bt-plant-incorporated> Acesso em 13/02/2022.

De acordo com o Grupo de Biotecnologia (GBio) do Comitê Brasileiro de Ação à Resistência de Inseticidas (IRAC-BR), o plantio de áreas de refúgio tem sido a principal estratégia adotada para retardar a evolução da resistência de insetos à cultura Bt em todo o mundo. No entanto, a efetividade das áreas de refúgio em gerar insetos suscetíveis pode ser reduzida ou até mesmo anulada pelo manejo inadequado de inseticidas ou pelo uso incorreto das áreas de refúgio (IRAC-BR, 2016).

A necessidade de estratégias eficazes no manejo de resistência está se tornando mais urgente à medida que o número de espécies resistentes a inseticidas continua aumentando em todo o mundo, enquanto as opções de princípios ativos estão diminuindo. As perspectivas para o desenvolvimento de estratégias de manejo de resistência são potencializadas pelos avanços na área da bioquímica, da genética molecular, da ecologia, da dinâmica, do monitoramento e de outros aspectos importantes para a prevenção da ocorrência de resistência. No geral, as abordagens reconhecidas para o manejo de resistência são agrupadas em três principais estratégias de ação: (1) Manejo por moderação: baixar a pressão de seleção, complementada por um forte componente de medidas não químicas; (2) Manejo por saturação: eliminar a vantagem seletiva de indivíduos resistentes, aumentando a absorção de inseticidas por meio do uso de atrativos, ou pela supressão de enzimas de desintoxicação por meio do uso de sinergistas; e (3) Manejo por ataque múltiplo: aplicação de seleção multidirecional por meio de misturas ou rotações de inseticidas com diferentes modos de ação, ou pelo uso de produtos químicos com ação multi-sítio. Estas estratégias não são excludentes e podem ser usadas de forma combinada para desenvolver um programa de Manejo de Resistência a Inseticidas durante a safra. A escolha da estratégia deve ser feita com base em um conhecimento aprofundado dos impactos da ocorrência de resistência aos inseticidas, assim como da biologia e ecologia das espécies em questão, devendo fazer uso de todas as medidas não químicas de controle disponíveis (GEORGHIOU, 1994).

Um exemplo da eficiência da estratégia de alta dose para o MRI tem sido verificado para as principais pragas-alvo de culturas Bt nos EUA e Canadá, *Ostrinia nubilalis* (Hübner) (Lepidoptera: Crambidae), *Diatraea grandiosella* Dyar (Lepidoptera: Crambidae), *C. virescens* e *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae), as quais após 15 anos de uso intensivo de milho e algodão Bt permanecem suscetíveis às proteínas inseticidas expressas nessas plantas

transgênicas (HUANG et al., 2011). Entretanto, para ser eficiente a estratégia de alta dose depende do uso de áreas de refúgio para evitar ou retardar a evolução da resistência das pragas-alvo (BERNARDI, 2012).

2.6.3 Refúgio “no saco de sementes”

Devido à baixa adoção de refúgios no Brasil, foi avaliado o uso de refúgio “no saco”, que consiste numa mistura de sementes de plantas Bt e não Bt adotada como estratégia de MRI. No entanto, concluiu-se que a mortalidade de *S. frugiperda* e *C. includens* em tecnologias de algodão Bollgard II e WideStrike diminui à medida que a idade larval aumenta, permitindo a sobrevivência dos insetos em um possível ambiente de mistura de sementes “no saco”, favorecendo a evolução da resistência (SORGATTO et al., 2015).

2.7. Legislação

2.7.1 Regulamentação sobre biotecnologia

No Brasil, a primeira Lei de Biossegurança foi a Lei nº 8.974, de 05/01/1995, que posteriormente foi revogada pela Lei 11.105 de 24/03/2005¹⁴, que está em vigor até os dias atuais. A implementação da tecnologia Bt em plantas GM só foi possível devido à aprovação da Lei de Biossegurança em 2005, que regulamentou todos os aspectos da produção de organismos geneticamente modificados no país. A partir de então, as sementes geneticamente modificadas com tecnologia Bt tiveram rápida adoção no país nos cultivos de algodão, milho e soja, dada a amplitude no controle dos principais insetos-praga (Tabela 2).

¹⁴ BRASIL. Lei 11.105, de 24 de março de 2005. Regulamenta os incisos II, IV e V do § 1º do art. 225 da Constituição Federal, estabelece normas de segurança e mecanismos de fiscalização de atividades que envolvam organismos geneticamente modificados – OGM e seus derivados, cria o Conselho Nacional de Biossegurança – CNBS, reestrutura a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança – CTNBio, dispõe sobre a Política Nacional de Biossegurança – PNB, revoga a Lei nº 8.974, de 5 de janeiro de 1995, e a Medida Provisória nº 2.191-9, de 23 de agosto de 2001, e os arts. 5º, 6º, 7º, 8º, 9º, 10 e 16 da Lei nº 10.814, de 15 de dezembro de 2003, e dá outras providências. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11105.htm Acesso em 27/09/2021

Tabela 2: Cultivos e insetos-praga controlados com proteínas Bt em plantas geneticamente modificadas.

Cultura Bt	Inseto-praga controlado
Algodão	Lagarta-rosada, <i>Pectinophora gossypiella</i> (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae) Curuquerê-do-algodoeiro, <i>Alabama argillacea</i> (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) Lagarta-da-maçã, <i>Chloridea virescens</i> (F.) (Lepidoptera: Noctuidae) Lagarta falsa-medideira, <i>Chrysodeixis includes</i> (F.) (Lepidoptera: Noctuidae) Lagartas do gênero <i>Spodoptera</i> spp. (Lepidoptera: Noctuidae)
Milho	Lagarta-do-cartucho, <i>Spodoptera frugiperda</i> (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) Broca-do-colmo, <i>Diatraea saccharalis</i> (F.) (Lepidoptera: Crambidae), Lagarta-da-espiga, <i>Helicoverpa zea</i> (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae) Lagarta-elasma, <i>Elasmopalpus lignosellus</i> (Zeller) (Lepidoptera: Pyralidae) Lagarta-rosca, <i>Agrotis ipsilon</i> (Hufnagel) (Lepidoptera: Noctuidae) Larva-alfinete, <i>Diabrotica speciosa</i> (Germar) (Coleoptera: Chrysomelidae)
Soja	Lagarta-da-soja, <i>Anticarsia gemmatilis</i> (Hübner) (Lepidoptera: Erebidae) Lagartas falsas-medideiras <i>Chrysodeixis includens</i> e <i>Rachiplusia nu</i> (Guenée) (Lepidoptera: Noctuidae) Lagarta-da-maçã, <i>Chloridea virescens</i> (Lepidoptera: Noctuidae) Broca-das-axilas <i>Crosidosema aporema</i> (Walsingham) (Lepidoptera: Tortricidae) Espécies do gênero <i>Helicoverpa</i> spp. (Lepidoptera: Noctuidae).

Fonte: CTNBio.

2.7.2. Regulamentação de produtos biológicos

A pesquisa, desenvolvimento, produção, comercialização e uso dos produtos biológicos, mesmo que naturais, podem ter efeitos adversos diretos ou indiretos na saúde da população e no meio ambiente. Para maximizar os benefícios e minimizar os riscos, os produtos biológicos passam por um processo de avaliação e regulamentação. Dessa forma, os produtos biológicos têm sido avaliados pela mesma regulamentação utilizada para o registro de pesticidas químicos (ingredientes ativos sintéticos). Esse procedimento tem sido adotado em países da União Europeia, Ásia, Estados Unidos e também no Brasil. Mesmo com nomenclatura distinta, os produtos biológicos têm sido agrupados, nos diferentes países, de forma semelhante: (1) Bioquímicos: extrato vegetal e produtos à base de óleo vegetal, (2) Semioquímicos: produtos com feromônios ou outros semioquímicos, (3) Microbiológicos: pesticidas com agentes microbianos (fungos, bactérias, vírus) e (4) Macrobiológicos: produtos que contêm organismos vivos (parasitoides e predadores).

No Brasil, a avaliação e registro de produtos para CB é controlada por três agências governamentais: Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) (MAPA, 2021)¹⁵. Os produtos biológicos são regulamentados pela Lei de agrotóxicos (Lei 7.802/89) e também por decretos e especificações de referências para essa classe de defensivos, a saber:

2.7.2.1 Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989

Dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências.

2.7.2.2 Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002

Regulamenta a Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, que dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências.

2.7.2.3 Decreto Nº 10.833, de 07 de outubro de 2021:

Altera o Decreto Nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002, que regulamenta a Lei Nº 7.802, de 11 de julho de 1989.

A legislação brasileira é extremamente complexa, burocrática e baseia-se na avaliação do perigo, ou seja, desatualizada do que atualmente é praticado no cenário global. A avaliação dos riscos é importante ferramenta do sistema regulador da grande maioria dos países desenvolvidos e tem sido utilizada desde a década de 1970

¹⁵ MAPA (2021). Filas de registro de agrotóxicos. Disponível em <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/filas-de-registro-de-agrotoxicos> Acesso em 29/01/2022.

como ferramenta de decisão regulatória por importantes agências como o Environmental Protection Agency (EPA) e o Food and Drug Administration (FDA) nos EUA e a European Food Safety Authority (EFSA) na Europa. Maior simplicidade e agilidade nesse processo serão decisivos para que os produtores rurais tenham ingredientes ativos eficientes e atualizados à disposição (MAPA, 2021).

2.7.2.4 Necessidade de regulamentação específica para biológicos

A inclusão dos produtos biológicos na mesma legislação dos defensivos agrícolas químicos, produtos que apresentam características tão diferentes, cria dificuldades para avaliação utilizando exatamente os mesmos critérios. A legislação sobre o assunto é ainda incipiente no Brasil, e foi adaptada de leis para químicos (PARRA et al., 2021 p. 586). Na prática, este fato tem exigido novas disposições nas legislações em vigor em diversos países, bem como a preparação de novas orientações técnicas e científicas que promovam o registo de produtos biológicos de forma mais adequada ao princípio da inovação¹⁶. A Lei 7.802/89, que regulamenta os agrotóxicos no Brasil, foi elaborada há mais de 3 décadas e precisa ser modernizada para se adequar à nova realidade da agricultura mundial, garantindo a competitividade da cadeia produtiva do agro no Brasil (Canal Agro, 2019¹⁷; Canal Rural, 2019¹⁸). Portanto, os produtos biológicos deveriam ter uma legislação própria, pois a segurança desses produtos para o consumidor e o meio ambiente deveriam ser avaliadas levando em consideração as suas particularidades (CROPLIFE BRASIL, 2020)¹⁹.

¹⁶ European Commission (2019). Innovation Principle. O princípio da inovação é uma ferramenta para ajudar a alcançar os objetivos políticos da União Europeia, garantindo que a legislação seja concebida de forma a criar as melhores condições possíveis para promover a inovação e sejam orientadas para o futuro. Disponível em https://ec.europa.eu/info/news/innovation-principle-makes-eu-laws-smarter-and-future-oriented-experts-say-2019-nov-25_en Acesso em 29/01/2022.

¹⁷ Estadão. Canal Agro. AgroSaber (2019). Modernização ajudará no desenvolvimento da agricultura. Disponível em <https://summitagro.estadao.com.br/agro-no-brasil/conteudo-patrocinado/modernizacao-ajudara-no-desenvolvimento-da-agricultura/> Acesso em 29/01/2022.

¹⁸ Canal Rural (2019). Modernização da lei de pesticidas traz eficiência e segurança para consumo. Disponível em <https://www.canalrural.com.br/conexao-brasilia/modernizacao-da-lei-de-pesticidas-traz-eficiencia-e-seguranca-para-consumo/> Acesso em 29/01/2022.

¹⁹ CropLife Brasil (2020). Disponível em <https://croplifebrasil.org/produtos-biologicos/regulamentacao-de-produtos-biologicos/> Acesso em 28/01/2022.

2.8 O mercado de produtos para controle biológico

O mercado global de produtos para CB movimentou mais de 5 bilhões de dólares em 2020 e tem crescido a uma taxa de 14,4% ao ano. Com demanda crescente pelos consumidores por alimentos livres de resíduos químicos, além da necessidade de manejar a resistência de pragas e doenças, a expectativa para 2025 é de que o mercado de produtos para CB movimente pelo menos 8 bilhões de dólares. A União Europeia e os Estados Unidos são os mercados que mais utilizam produtos biológicos para o controle de pragas e doenças. Na América Latina, o Brasil é líder na utilização de produtos para CB e em 2020, o crescimento foi de 30%. Em 2020, a indústria de produtos biológicos atingiu o faturamento superior a 227,2 milhões de dólares no Brasil, com crescimento de 75% em relação a 2019. De acordo com os resultados de uma pesquisa da Consultoria Blink Projetos Estratégicos, o mercado de produtos biológicos deve ultrapassar 713 milhões de dólares no Brasil em 2030. Mesmo representando 14% dos produtos para CB registrados, os bionematicidas são os produtos que lideraram o faturamento de biológicos comercializados no país em 2020, seguido pelos bioinseticidas, biofungicidas e os biológicos para tratamento de sementes (TS), que representaram 19% do faturamento (BLINK, 2021)²⁰.

De acordo com levantamento *Business Intelligence Panel* (BIP), da Spark Inteligência Estratégica (2021)²¹, os mercados de defensivos agrícolas biológicos e bioinoculantes registraram novos crescimentos na safra 2020/2021. O estudo revelou que mercado total de bioinsumos movimentou R\$ 1,7 bilhão, com crescimento de 37% comparado a safra o 2019/2020 (R\$ 1,235 bilhão). Somados, esses dois segmentos corresponderam a 3% das vendas do setor de defesa vegetal, que segundo a Spark subiram 16%, para R\$ 53,83 bilhões, ante R\$ 46,559 bilhões. No mercado de produtos para CB, os bionematicidas lideraram as vendas, com a participação de 43% (R\$ 724 milhões), seguido pelos bioinseticidas, que responderam por 25% ou R\$ 417 milhões,

²⁰ CropLife Brasil: Cresce a adoção de produtos biológicos pelos agricultores brasileiros. Disponível em <https://croplifebrasil.org/noticias/cresce-a-adoacao-de-produtos-biologicos-pelos-agricultores-brasileiros/> Acesso em 10/09/2021.

²¹ Spark Inteligência Estratégica (2021). BIP Spark mostra aumento de 37% na movimentação do mercado de produtos biológicos, para R\$ 1,7 bilhão. Disponível em <https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/agronegocio/302521-bip-spark-mostra-aumento-de-37-na-movimentacao-do-mercado-de-produtos-biologicos-para-r-1-7-bilhao.html#.YeM053rMLIU>. Acesso em 15/01/2022. Disponível em <https://www.koppert.com.br/noticias/2021/comercializacao-de-biologicos-cresce-37-na-safra-2020/21/> Acesso em 21/01/2022.

e pelos biofungicidas, com 9% ou R\$ 159 milhões. O mercado de produtos para CB atingiu R\$ 1,3 bilhão, valor 37% superior à safra 2019/2020 (R\$ 948 milhões).

Ainda segundo a Spark (2021), a cultura da soja tratou com produtos de CB 7,9 milhões de hectares (21% da área), em algodão 857 mil hectares (67% da área), no milho safrinha 1.89 milhão de hectares (13% da área) e no milho verão 144.000 hectares (4% da área). Em cana, o levantamento registrou o uso em 4.5 milhões de hectares (50% da área total), dando conta da maior importância dos biológicos para grandes cultivos no Brasil.

O Brasil é um dos países mais importantes no mercado global de produtos biológicos principalmente pelo potencial de área, diversidade de culturas, clima, incidência de pragas e doenças. Os produtores estão utilizando cada vez mais produtos biológicos diante de suas vantagens em relação à segurança, eficiência, custo e flexibilização nas aplicações e complementando os químicos no manejo integrado de pragas e doenças. O MAPA, além de ter lançado o Programa Nacional de Bioinsumos (PNB)²², tem priorizado o registro de produtos biológicos e, em 2021 registrou mais 77 produtos biológicos (57 microrganismos, 11 macrorganismos, 1 semioquímico e 8 bioquímicos) para o controle de pragas e doenças na agricultura. Em dezembro de 2021 o Brasil atingiu a marca de 480 produtos biológicos registrados (51% bioinseticidas, 16% biofungicidas, 14% bionematicidas, 7% feromônios, 5% regulador de crescimento, 4% biobactericida e 3% outros) MAPA (2021)²³. A grande inflexão na curva de crescimento dos produtos de CB no Brasil ocorreu em 2013, quando bioinseticidas mostraram eficiência no controle da lagarta *H. armigera*, uma praga que estava causando grandes prejuízos na soja. Desde então, os investimentos em pesquisa e desenvolvimento de produtos biológicos foram intensificados e resultaram em maior inovação tecnológica e lançamentos de novos produtos para CB. De acordo com a CropLife Brasil (2021)²⁴, em 2019 e 2020 houve um processo

²² O Programa Nacional de Bioinsumos, instituído pelo Decreto Nº 10.375 de 26/05/2020, tem por objetivo ampliar e fortalecer a utilização de bioinsumos para a promoção do desenvolvimento sustentável da agropecuária brasileira. Disponível em <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos> Acesso em 17/02/2022.

²³ (MAPA, 2021) Disponível em <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/novos-produtos-de-baixo-impacto-para-o-controle-de-pragas-tem-registro-publicado>. Acesso em 15/01/2022).

²⁴ CropLife Brasil (2021). Regulamentação de produtos biológicos. Disponível em <https://croplifebrasil.org/produtos-biologicos/regulamentacao-de-produtos-biologicos/>. Acesso em 10/09/2021.

de consolidação do mercado brasileiro, passando pelo interesse de grandes empresas nas soluções biológicas, industriais e plataformas de distribuição.

De acordo com a consultoria Spark Smarter Decisions²⁵, apenas uma das empresas que comercializa baculovírus para o controle de lagartas, tratou 3,5 milhões de hectares na safra 2020/2021, apresentando um crescimento na participação no mercado de biológicos de 17% para 37% no Brasil, seguido por grandes empresas agrícolas. As empresas com alto nível de tecnificação e exportadoras, perseguem constantemente a inovação, a competitividade, a eficácia agrônômica e a sustentabilidade entregues pelo manejo biológico de pragas.

2.9 Relações ecológicas no controle biológico

2.9.1 Relações tritróficas

Na natureza, as relações tróficas entre os organismos dentro de uma comunidade raramente, ou nunca, consistem apenas em cadeias alimentares simples. Mais comumente, eles compreendem uma extensa rede de interações que se estendem por vários níveis tróficos. As relações tróficas entre plantas, insetos herbívoros e seus parasitoides são um bom exemplo dessas complexidades. Essas interações tritróficas ocorrem dentro de um ambiente espacialmente diverso e fisicamente e quimicamente dinâmico e incluem as diversas formas agressivas e defensivas de interações entre os níveis tróficos (incluindo relacionamentos morfológicos, comportamentais e fisiológicos), bem como as interações inter e intra específicas dentro de cada nível trófico. Tais interações são muitas vezes fortemente entrelaçadas e altamente interdependentes (DE MORAES, 2000). Os organismos consumidores primários (macrorganismos ou microrganismos), são pragas potenciais quando prejudicam a saúde das plantas e causam perda de produtividade. Os organismos consumidores secundários, terciários ou de ordem superior, que se alimentam dos consumidores primários por meio de interações tróficas ou antagônicas, agem controlando essas populações. Conhecer a dinâmica das populações das espécies que compõem os diferentes níveis tróficos nas lavouras de

²⁵ Spark, em matéria publicada no Agrolink em 13/09/2021. Disponível em https://www.agrolink.com.br/noticias/baculovirus-contra-lagartas-e-usado-em-3-5-mi-ha_455805.html Acesso em 19/01/2022.

algodão, milho e soja é essencial para compreensão do controle biológico nos sistemas de produção agrícola (FONTES; VALADARES, 2020).

As plantas, quando atacadas por insetos praga, produzem semioquímicos que podem atuar como repelentes ao herbívoro e/ou atraentes de organismos antagonistas ao herbívoro, tais como predadores e parasitoides. Além disso, as plantas podem também emitir sinais que informam outras plantas de um ataque eminente e assim podem preparar-se para a defesa (RIFFEL et al., 2013).

O entendimento de relações ecológicas e toxicológicas envolvendo culturas geneticamente modificadas (GM) e agentes de controle biológico é de grande importância para discussões relativas à compatibilidade de culturas GM com estratégias de manejo integrado e manejo de resistência de pragas. Como exemplo, um trabalho realizado por Souza et al., 2021 avaliou o comportamento de busca e a capacidade predatória de *Orius insidiosus* (Say) (Hemiptera: Anthocoridae) e *Doru luteipes* (Scudder) (Dermaptera: Forficulidae) sobre ovos e lagartas de *S. frugiperda* resistente ou não à proteína Cry1F expressa em milho Bt. O estudo concluiu que *O. insidiosus* e *D. luteipes* não percebem a presença da proteína Cry1F na presa *S. frugiperda*, o que pode contribuir para o uso integrado de milho Bt e controle biológico em programas de manejo integrado e manejo de resistência de pragas (SOUZA et al., 2021).

2.9.2 Inimigos naturais no controle biológico

De maneira geral, o controle biológico tem sido efetivado pelo uso de três estratégias: (1) controle biológico clássico, (2) o “aumento” dos agentes de controle biológico já existentes em determinada área ou (3) a “conservação” desses agentes (CRUZ, 2002).

O “controle biológico clássico” é baseado na importação, liberação e estabelecimento definitivo de inimigos naturais exóticos (parasitoides, predadores ou patógenos). Desta forma, o método de controle biológico clássico é uma estratégia que propicia um controle duradouro da praga-alvo. Uma vez que a eficácia no controle é alcançada em um local, os mesmos inimigos naturais podem ser utilizados para

controlar as mesmas pragas em outras regiões de clima semelhante. Esse fato é amplamente amparado na literatura científica, com centenas de casos de sucesso.

A estratégia de “aumento” de inimigos naturais numa área envolve os esforços para aumentar a população ou os efeitos benéficos dos inimigos naturais tanto de pragas nativas como de pragas exóticas (RABB et al., 1976, RIDGWAY; VINSON, 1977). O aumento dos inimigos naturais pode ser feito por meio de liberações periódicas dos agentes de controle biológico, de forma inundativa ou inoculativa. Outra forma de aumentar a população de inimigos naturais é por meio da manipulação do ambiente em que eles habitam, por exemplo: fornecendo hospedeiros ou presas alternativas, uso de semioquímicos para melhorar o desempenho do inimigo natural, fornecimento de alimentos para adultos, ou condições adequadas para refúgios, assim como mudanças nas práticas culturais para favorecer os inimigos naturais. A manipulação do ambiente pode ser feita de forma combinada com a liberação de agentes de controle biológico. As estratégias de uso do biocontrole por meio do modo clássico (“importação”) ou da técnica do “aumento populacional” local implicam a manipulação dos inimigos naturais diretamente por liberações.

Já na estratégia de biocontrole por meio da “conservação” dos inimigos naturais, trabalha-se com as populações dos inimigos naturais existentes de maneira indireta, tornando o ambiente mais favorável. Na estratégia de conservação, busca-se minimizar as ações de ruptura do biocontrole natural, que pode ser obtida pela substituição de ingredientes ativos, doses, formulação, época e local de aplicação (HULL & BEERS, 1985). No entanto, o biocontrole pelo método de conservação também é parte importante de qualquer estratégia, seja a clássica ou do aumento populacional.

2.10 Soluções de controle biológico para ordem Lepidoptera

As soluções relacionadas a seguir foram agrupadas considerando a possibilidade de ajudar nas estratégias de MRI e MIP em lavouras de algodão, milho e soja com tecnologia Bt.

2.10.1 Baculovirus

O CB com vírus entomopatogênicos como estratégia no MIP, pode ser uma solução duradoura e efetiva protegendo o meio ambiente sem impacto sobre insetos benéficos e vertebrados, incluindo o homem. O reconhecimento de que os baculovírus são ambientalmente seguros aumentou o potencial dos mesmos como alternativa aos inseticidas químicos (BARRETO et al., 2005). Os baculovírus são bem conhecidos pela sua utilidade como agentes de controle biológico (MOSCARDI, 1999). Historicamente, vêm sendo utilizado como reguladores de populações de pragas e em sistemas de MIP (FONTES; VALADARES, 2020 p. 239).

A família *Baculoviridae* é hospedeiro específico restrito a artrópodes e são organizados em quatro gêneros (JEHLE et al., 2006):

- Alphabaculovirus: inclui todos os NPVs de lepidópteros formadores dos fenótipos virais BV (do inglês budded virus) e ODV (do inglês occlusion-derived virus);
- Betabaculovirus: compreende os GVs de lepidópteros que também formam partículas virais durante a infecção;
- Gammabaculovirus: específico de himenópteros engloba os NPVs que não possuem genes correspondentes às proteínas específicas da partícula BV;
- Deltabaculovirus: inclui os baculovírus de dípteros que não apresentam em seu genoma um gene homólogo ao que codifica a expressão da poliedrina, característico dos demais NPVs.

Os gêneros NVP e o GV atuam inicialmente no intestino médio dos insetos e apresentam infecção celular em todos os tecidos do inseto hospedeiro (HERNIOU et al., 2012).

Entre os NPV, *S. frugiperda multiple nucleopolyhedrovirus* (SfMNPV) é uma alternativa para o MIP de *S. frugiperda* devido a sua alta especificidade, segurança ambiental e alto nível de virulência (GRZYWACZ, 2017).

Como exemplo da eficiência dos vírus entomopatogênicos, *Baculovirus spodoptera* é um vírus de poliedrose eficiente para controlar a lagarta-do-cartucho, *S. frugiperda* (VALICENTE; COSTA, 1995; BARRETO et al., 2005) e, por sua alta

especificidade e ocorrência natural, como outros baculovírus, são ótimos candidatos para programas de manejo integrado de pragas (TANADA; KAYA, 1993; MOSCARDI, 1999).

De acordo com Valicente (2018)²⁶, foi a partir do *Baculovirus spodoptera* que foi desenvolvido o primeiro bioinseticida à base de vírus para o controle de *S. frugiperda*. Este bioinseticida tem grande eficácia para controle da lagarta-do-cartucho, com até 1 cm de comprimento. De acordo com Bueno (2020)²⁷, os produtos à base de baculovírus demoram aproximadamente 7 dias para controlar as lagartas, enquanto os inseticidas químicos variam de 2 a 4 dias. Sendo assim, é necessário que os produtos à base de baculovírus sejam aplicados quando a maioria das lagartas têm menos de 1,5 cm. Os baculovírus são agentes de controle biológico que causam a morte do inseto-praga e são seletivos aos inimigos naturais das pragas. Testes de biossegurança comprovaram que esses vírus são inofensivos a microrganismos, plantas, vertebrados e outros invertebrados que não sejam insetos.

2.10.2 Semioquímicos

De acordo com a Embrapa (2004), os semioquímicos são substâncias químicas produzidas por organismos que interferem no comportamento de outros seres vivos. Existem dois grandes grupos de semioquímicos: os feromônios, utilizados para comunicação entre insetos da mesma espécie, e os aleloquímicos, utilizados na comunicação entre insetos de espécies diferentes. Os feromônios sexuais tem aberto novas possibilidades para o manejo e o controle de pragas na agricultura. Ao longo de quase 60 anos de estudos – a partir da identificação do primeiro feromônio, o feromônio sexual da mariposa *Bombyx mori* (L.) (Lepidoptera: Bombycidae), a utilização de semioquímicos tanto no monitoramento quanto no controle de pragas vem crescendo gradativamente e ganhando espaço em áreas como a agricultura, a pecuária e a de saúde pública (Embrapa, 2020)²⁸. Os semioquímicos (feromônios,

²⁶ Valicente (2018). Embrapa oferece conhecimentos para controle da lagarta-do-cartucho. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/33080973/embrapa-oferece-conhecimentos-para-controle-da-lagarta-do-cartucho> Acesso em 05/02/2022

²⁷ Bueno (2020). Micro, mas poderosos: defensivos microbiológicos. Disponível em <https://croplifebrasil.org/noticias/micros-mas-poderosos/> Acesso em 06/02/2022.

²⁸ EMRAPA. Controle biológico de pragas da agricultura / Eliana Maria Gouveia Fontes, Maria Cleria Valadares-Ingliš, editoras técnicas. – Brasília, DF : Embrapa, 2020. P.440.

caiomônios, alomônios e sinomônios) podem ser usados em armadilhas no campo com o intuito de confundir, atrair ou repelir os insetos das culturas ou evitar que eles encontrem o parceiro para acasalamento (LIMA; DELLA LUCIA, 2001).

2.10.2.1 Feromônios

Os feromônios são compostos naturais produzidos por insetos que atuam como mensageiros que afetam o comportamento de outros insetos individuais. Normalmente, transportados pelo vento, eles desempenham muitos papéis, ajudando os insetos a encontrar um companheiro e comida, mas também escapando de predadores. Os feromônios envolvidos na busca de um parceiro são chamados de feromônios sexuais. Eles geralmente são liberados por insetos fêmeas para atrair um macho. Esses poderosos atrativos podem ser sintetizados artificialmente e usados de várias maneiras para o controle populacional de insetos. Os feromônios são estudados e utilizados *com* sucesso no MIP, especialmente, para monitorar as populações de inseto-praga, removê-las do ambiente (coleta massal) ou interferir diretamente no seu comportamento e reduzir os danos e as injúrias (“atrai-e-mata” e confusão sexual). Existe uma extensa literatura sobre este tema com inúmeros casos de sucesso (WITZGALL et al., 2010).

2.10.2.1.1 Extratos vegetais voláteis mais inseticida “atrai-e-mata”

A tecnologia com extratos vegetais voláteis mais o uso combinado de inseticida “atrai-e-mata” foi desenvolvida com base no princípio de atrair insetos praga adultos de ambos os sexos para eliminação, ou seja, o semioquímico atrai tanto as fêmeas quanto os machos do inseto praga, por meio de uma formulação desenvolvida com a mistura de extratos vegetais voláteis, combinado com um inseticida de choque. Uma dessas soluções, desenvolvida na Austrália, foi registrada em 2009, tendo como alvo a *H. armigera* e *H. punctigera* na cultura do algodão (GREGG et al., 2016). No Brasil, a empresa de origem australo-americana lançou em 2021 o produto descrito conceitualmente como um “atrativo”, para controlar a população de mariposas (*S. frugiperda*, *Spodotera eridania*, *Spodoptera cosmioides*, *Anticarsia gemmatalis*, *Elasmopalpus lignosellus*, *H. armigera*, *H. zea*, *Chloridea virescens* e outras) nas

lavouras de algodão. Ferramenta de controle biológico, a solução pode ser adicionada ao MIP, além de contribuir para o MRI a plantas GM com tecnologia Bt e inseticidas químicos (Revista Cultivar, 2021)²⁹.

2.10.2.1.2 Feromônios sexuais

Os feromônios sexuais são usados em sistemas agrícolas com dois objetivos principais: (1) como atrativo para armadilhas usadas para monitoramento da atividade da dinâmica populacional (ANSHELEVICH et al., 1994); (2) para controlar pragas, promovendo a interrupção de acasalamento ou técnicas para atrair e matar (ARN; LOUIS, 1997; CHARMILLOT et al., 2000). As vantagens do uso de feromônios são que, ao contrário dos inseticidas, eles geralmente não são tóxicos e agem de forma específica para determinada espécie. Um dos principais usos do feromônio sexual é confundir os insetos machos, para que eles não possam encontrar a fêmea. Quando os machos não encontram a fêmea, o processo de acasalamento é interrompido. Como resultado, a reprodução é impedida e menos descendentes serão produzidos na próxima geração. Essa maneira de controlar a população de insetos e diminuir o tamanho das gerações futuras é o conceito base da interrupção do acasalamento. No entanto, apesar do progresso considerável que tem sido alcançado, a técnica de interrupção de acasalamento não tem sido amplamente utilizada (KARG; SAUER, 1997).

2.10.3 Macrorganismos (parasitoides e predadores)

Atualmente, o controle de insetos praga no milho tem sido realizado, predominantemente, por inseticidas químicos ou eventos transgênicos com tecnologia Bt. No entanto, o uso de agentes de controle biológico tem sido considerado o método de controle mais sustentável, proporcionando alta eficácia (COLMENAREZ et al., 2022).

²⁹ Revista Cultivar. 10/03/2021 | Fernanda Campos. AgBiTech lança tecnologia no controle biológico de lagartas e ao manejo de resistência para algodão. Disponível em <https://revistacultivar.com.br/noticias/agbitech-lanca-tecnologia-no-controle-biologico-de-lagartas-e-ao-manejo-de-resistencia-para-algodao>. Acesso em 15/01/2022.

2.10.3.1 Parasitoide *Trichogramma pretiosum*

As espécies de *Trichogramma* estão entre os parasitoides mais estudados no mundo, chegando a ter 28 espécies liberadas na década de 1980, em 28 países, para controle de lepidópteros-praga em culturas anuais ou perenes (HASSAN, 1997; VAN LENTEREN, 2012), em áreas correspondentes a 32 milhões de hectares (SMITH, 1996). Entre as espécies desse parasitoide de ovos, *T. pretiosum* Riley (Hymenoptera: Trichogrammatidae) é encontrado frequentemente, ocorrendo em diversas partes do mundo. Na América do Sul, *T. pretiosum* além de ser a espécie mais amplamente distribuída, é considerada a mais polífaga, e foi associada a 26 espécies de hospedeiros. No Brasil, essa espécie foi associada a diversos hospedeiros, destacando-se como o parasitoide que ocorreu com maior frequência (ZUCCHI; MONTEIRO, 1997). De acordo com Cruz (2018)³⁰, a estabilidade da eficiência do *Trichogramma* tem sido alcançada quando associada ao uso de armadilhas adesivas contendo feromônio sexual sintético da praga, que colocado na área, indica a chegada da praga e a necessidade de liberação da vespa. Segundo Parra (2021, p. 203) assinala, a utilização de *Trichogramma* em programas de CB Aplicado ou Aumentativo no Brasil é crescente. Nas últimas safras o parasitoide foi liberado em cerca de 3,5 milhões de hectares, com uma dezena de empresas comercializando esse agente. Os dados qualificam esta tecnologia como importante tática de controle de pragas no Brasil e como parte de programas de MIP. Com as três espécies de *Trichogramma* mais usadas na agricultura brasileira, *T. pretiosum*, *T. galloi* Zucchi e *T. atopovirilia* (Oatman & Platner), e a criação “in vivo”, o Brasil está na vanguarda desse tipo de estudo em relação a países desenvolvidos. Extensas áreas são tratadas para controle de *H. armígera* e *C. includens* em soja, onde cerca de 250 mil hectares foram tratados na safra 2013/2014. Esses números poderão aumentar se houver disponibilidade de insumo biológico, com potencial de uso em grande escala em algodoeiro e no milho, para os quais *Trichogramma* já é utilizado em números variáveis e pode atingir áreas bem maiores na agricultura brasileira (PARRA, et al., 2021).

³⁰ CRUZ (2018). Embrapa oferece conhecimentos para controle da lagarta-do-cartucho. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/33080973/embrapa-oferece-conhecimentos-para-controle-da-lagarta-do-cartucho> Acesso em 05/02/2022

2.10.3.2 Parasitoide *Telenomus remus*

O parasitoide de ovos *Telenomus remus* Nixon (Hymenoptera: Scelionidae) é nativo da Malásia peninsular e Papua Nova Guiné (WENGRAT et al., 2021) e foi utilizado para o controle de várias espécies de pragas do gênero *Spodoptera* (POMARI et al., 2012; BUENO et al., 2008; 2010; FERRER 2001; 2021). A biologia e ecologia deste parasitoide de ovos foram estudadas no passado e revisado por Caverna (2000). Além de sua alta fecundidade, *T. remus* é especialmente notável por sua ação eficaz em ovos de *Spodoptera* spp. em camadas sobrepostas, até parasitando ovos localizados nas camadas internas da massa de ovos (FIGUEIREDO et al., 1999; BUENO et al., 2008). Além do mais, *T. remus* tem alta dispersão (Pomari-FERNANDES et al., 2018) e capacidades de busca de hospedeiros (POMARI et al., 2013a) sublinhando seu potencial para programas de controle biológico aumentativo. Digno de nota, *T. remus* foi lançado, no mercado, para o controle da lagarta do cartucho no milho em larga escala (vários milhares de ha) durante a década de 1990 na Venezuela como parte de um programa MIP e em escala um pouco menor até recentemente (FERRER 2001; 2021). Essas liberações resultaram em uma redução geral no uso de inseticidas contra a lagarta do cartucho de entre 49 e 80%. *T. remus* determinou até 90% do parasitismo de ovos de lagarta-do-cartucho após lançamentos (FERRER, 2021; HERNÁN DE et al., 1989).

Até o momento, não há recomendação disponível e nem registro para viabilizar o uso de *T. remus* para o controle da lagarta do cartucho ou pragas relacionadas no Brasil. Mais estudos serão necessários para determinar, com precisão, quais são as quantidades ideais de liberação, momento de liberação e frequências, número de pontos para lançamento, o melhor método e tecnologia para lançamentos, além de outros aspectos como qual o tamanho dos campos para atingir um controle de pragas eficiente. Infelizmente, ainda há poucos dados disponíveis sobre o real efeito que as liberações em massa de *T. remus* têm na redução de danos às plantas e aumento da produtividade, mas as altas taxas de parasitismo de ovos juntamente com evidências de longo prazo que foram relatadas na Venezuela, sugerem que *T. remus* tem de fato alto potencial para controlar com sucesso a lagarta do cartucho e outras pragas (COLMENAREZ et al., 2022).

2.10.3.3 Insetos transgênicos autolimitantes

Avanços recentes na engenharia genética permitiram o desenvolvimento de insetos transgênicos que carregam um gene letal específico que elimina a reprodução de fêmeas (THOMAS et al., 2000). Em uma estratégia que mimetiza programas de técnicas de insetos estéreis, a liberação de um grande número de machos transgênicos pode reduzir as populações-alvo, pois não haverá descendentes viáveis decorrentes do acasalamento de fêmeas nativas e machos transgênicos (THOMAS et al., 2000; ALPHEY et al., 2008; ALPHEY et al., 2009; GENTILE et al., 2015).

A tecnologia utiliza insetos transgênicos adultos machos da lagarta do cartucho do milho que carregam gene com a tecnologia autolimitante para encontrar e acasalar com as fêmeas da mesma espécie que infestam as lavouras de milho. Estes cruzamentos não produzem descendentes fêmeas na geração seguinte, o que significa menos lagartas se alimentando e danificando a plantação, e menos mariposas fêmeas para efetuar posturas futuras. A liberação de mariposas machos autolimitantes no campo também pode oferecer proteção ativa às culturas GM com tecnologia Bt e a outras ferramentas utilizadas para controle tradicional das lagartas de *Spodoptera*, o que significa que o uso de insetos autolimitantes podem ser mais uma ferramenta para o MRI, contribuindo para aumentar a longevidade das tecnologias de controle de lagartas disponíveis atualmente. Essa tecnologia pode reduzir o tamanho da população de lagartas e retardar a evolução da resistência ao introduzir genes suscetíveis através dos machos (ZHOU, 2018). Trabalho publicado por Reavey, Walker, Joyce, et al. (2022), descreveu a primeira transformação germinativa da lagarta-do-cartucho e o desenvolvimento de uma linhagem de insetos machos transgênicos autolimitantes (OX5382G), que promove a mortalidade completa de insetos fêmeas nativas. Experimentos em laboratório mostraram que os insetos-machos transgênicos desta linhagem são competitivos contra insetos machos nativos para copular com as fêmeas nativas. Após a liberações de insetos machos transgênicos autolimitantes OX5382G, as populações controladas destes insetos-praga se reduziram rapidamente até a extinção. Modelagem populacional simulando a liberação de machos OX5382G em “culturas GM Bt” e “refúgio não-Bt”, mostram que a liberação de insetos machos

transgênicos OX5382G pode eliminar as populações de *S. frugiperda* e retardar a ocorrência da resistência às proteínas inseticidas Bt (REAVEY et al., 2022). A liberação de insetos machos transgênicos autolimitantes em área de cultivos GM com proteínas Bt se apresenta como uma alternativa viável e com potencial para ser usada na estratégia de MRI.

2.11 Monitoramento de lepidópteros em algodão, milho e soja:

O monitoramento da população de insetos é uma atividade essencial para a saúde das lavouras de algodão, milho e soja, pois permite que o agricultor avalie com antecedência a evolução da população de pragas e realize as medidas de controle necessárias para evitar danos econômicos. O monitoramento faz parte do MIP. De acordo com a Embrapa (2000), essa tecnologia orienta na tomada de decisões de controle de pragas com base num conjunto de informações sobre os insetos e sua densidade populacional, na ocorrência de inimigos naturais e na capacidade da cultura de tolerar os danos. Assim, o monitoramento da lavoura, a identificação correta das pragas e dos inimigos naturais, o conhecimento do estágio de desenvolvimento da planta e dos níveis de ação são importantes componentes do MIP. Para cada inseto-praga é determinado um Nível de Ação (NA) e o Nível de Dano Econômico (NDE). De acordo com Bueno e Sosa-Gómez (2021), os inseticidas para controlar lagartas desfolhadoras devem ser aplicados apenas quando a desfolha for igual ou superior a 30% durante o estágio vegetativo da soja ou 15% no estágio reprodutivo. Aplicações de inseticidas antes desses níveis serem alcançados além de representar um aumento de custo desnecessário ao sojicultor, irá também diminuir a eficiência do refúgio, não permitindo a geração de insetos suscetíveis que são os responsáveis por manter a eficiência da tecnologia. Aliado às diversas opções de controle biológico e inseticidas químicos, o monitoramento compõe as principais medidas de controle fitossanitário e MRI em lavouras GM com tecnologia Bt. O monitoramento no MIP deve ser feito, pelo menos, uma vez por semana para garantir que a população de insetos praga não atinja o NDE, além de evitar aplicações desnecessárias e afetar a rentabilidade (SENAR, 2018). Quando o produtor tem conhecimento do local em que está ocorrendo maior densidade de pragas (quantidade mais próxima do NA ou onde esse nível já foi atingido com base no número de lagartas por metro quadrado ou percentual de desfolha), a gestão se torna mais assertiva. Portanto, o sucesso do MIP

depende, entre outros pré-requisitos, de avaliações confiáveis, precisas e rápidas da densidade populacional das pragas e de seus inimigos naturais presentes nas lavouras (RUESINK; KOGAN, 1982; MORALES; SILVA, 2006; CORRÊA-FERREIRA, 2012).

2.11.1 Benefícios econômicos do MIP: o exemplo da soja no Paraná

A tecnologia de Manejo Integrado de Pragas da Soja (MIP-Soja) foi implantada no Brasil, na década de 1970, e tem sido aperfeiçoada constantemente (HOFFMANN, 2000). De acordo com Conte et al. (2020), a partir da safra 2013/2014, ocorreu uma intensificação de ações numa parceria entre o IDR-Paraná e a Embrapa Soja, por meio do programa continuado MIP-Soja no Paraná, com uma prática atual e moderna para transferência de tecnologia, com resultados expressivos em ganhos econômicos e ambientais, proporcionando benefícios concretos para os agricultores e a sociedade. Ao longo de sete safras (2013/2014 a 2019/2020), o Programa MIP-Soja no Paraná analisou 1.108 lavouras que implementaram o MIP-Soja e 3.308 lavouras com o manejo convencional. Embora tenha sido utilizado apenas inseticidas químicos para controle das pragas, os resultados consolidados ao longo das sete safras é consistente e demonstrou a redução média das aplicações de inseticidas de 3,9 para 1,9 por safra, ou seja, praticamente a metade das aplicações, gerando uma economia de inseticidas superior a 51%, economizando 2,3 sacas de soja por hectare. Além dos menores custos, a primeira aplicação de inseticida nas áreas de MIP ocorreu, em média, mais de 21 dias após a primeira aplicação nas áreas que seguiram realizando o manejo convencional, com a aplicação calendarizada. Sobre a produtividade, o Programa MIP-Soja registrou a média de 58,2 sacas/hectare, contra 57 sacas/hectare das áreas que adotaram o manejo convencional (CONTE et al. 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 e 2019). Apesar de todos os resultados positivos da adoção do MIP-Soja registrados ao longo de 7 safras, muitos produtores ainda optam por fazer a aplicação de inseticidas baseada em calendários, ou aproveitam aplicação de outros produtos, como herbicidas e fungicidas e não consideram os NA para cada praga, resultando em aplicações desnecessárias (BUENO et al., 2012).

Na safra 2020/2021, foram conduzidas 709 Unidades de Referência (UR) no estado do Paraná, onde foram geradas as informações e dados de ocorrência das

principais pragas da e soja e os custos de controle de pragas, demonstrando a consistência da economia de 50% na aplicação de inseticidas, obtida com a adoção do MIP-soja (média de 1,72 aplicações e custo médio de 1 saca/hectare), comparativamente à média do manejo convencional de pragas (média de 3,41 aplicações/hectare e custo médio de 2 sacas/hectare) em soja Bt e soja não-Bt. Como pode ser constatado na Tabela 3, a adoção do MIP-Soja e de seus níveis de ação nas áreas de soja não-Bt, assim como na área de soja Bt, contribuem para o melhor funcionamento do refúgio agrícola e evitam gastos desnecessários com inseticidas, proporcionando maior sustentabilidade e lucratividade para o sojicultor.

Tabela 3: Composição do custo médio de controle de pragas embasado em dados de levantamentos de lavouras assistidas e não assistidas pelo programa MIP-Soja, conduzidas no estado do Paraná, safra 2020/2021 (Adaptado de CONTE et al., 2020).

Região		Nº URs	Nº médio de aplicações	Custo (R\$/ha) ¹			Custo ³ sc/ha (%)	Produtividade média (sc/ha)
				Insumos ²	Aplicação	Total		
MIP Soja*	Média PR***	191	1,72	76,87	86,00	162,87	1,0 (1,7)	60,9
	Soja Bt	142	1,70	75,98	85,00	160,98	1,0 (1,6)	62,7
	Soja não Bt	49	1,78	79,55	89,00	168,55	1,1 (1,9)	55,6
Soja**	Média PR***	518	3.41	144.09	170.85	314.94	2,0 (3,3)	60.3
	Soja Bt	396	3.00	126.69	150.22	276.90	1,8 (2,9)	60.9
	Soja não Bt	122	4.75	200.58	237.84	438.42	2,8 (4,8)	58.6

¹Custo médio da operação de pulverização estimado em R\$50,00/ha. Preço médio da saca de soja R\$157,00. Custo ponderado dos inseticidas, por aplicação, considerando o percentual de participação por grupos de mecanismos de ação e doses usadas R\$44,69 (MIP-Soja*) R\$42,25 (Soja**). ²Custo médio de inseticidas e adjuvantes por aplicação X número médio de aplicações; ³Percentual da produtividade gasto com o controle de pragas. ***Média ponderada. ****A ser publicado.

Os dados da safra 2020/2021 de soja no Paraná revelam que a maior quantidade das aplicações de inseticidas se destina a controlar o percevejo-marrom da soja [*Euschistus heros* (F.) (Hemiptera: Pentatomidae)], sendo que as aplicações para controlar lagartas (*A. gemmatilis* e *C. includens*), ocorreram em quantidade bem menor, como pode ser constatado no gráfico da Figura 1. Esse fato traz um alerta sobre a necessidade de adotar uma estratégia mais seletiva para controlar o percevejo

(*E. heros*) nas áreas de refúgio agrícola, uma vez que as aplicações de inseticidas químicos para controlar percevejos podem afetar a população de lagartas suscetíveis à tecnologia Bt e colocar em risco a eficiência do refúgio.

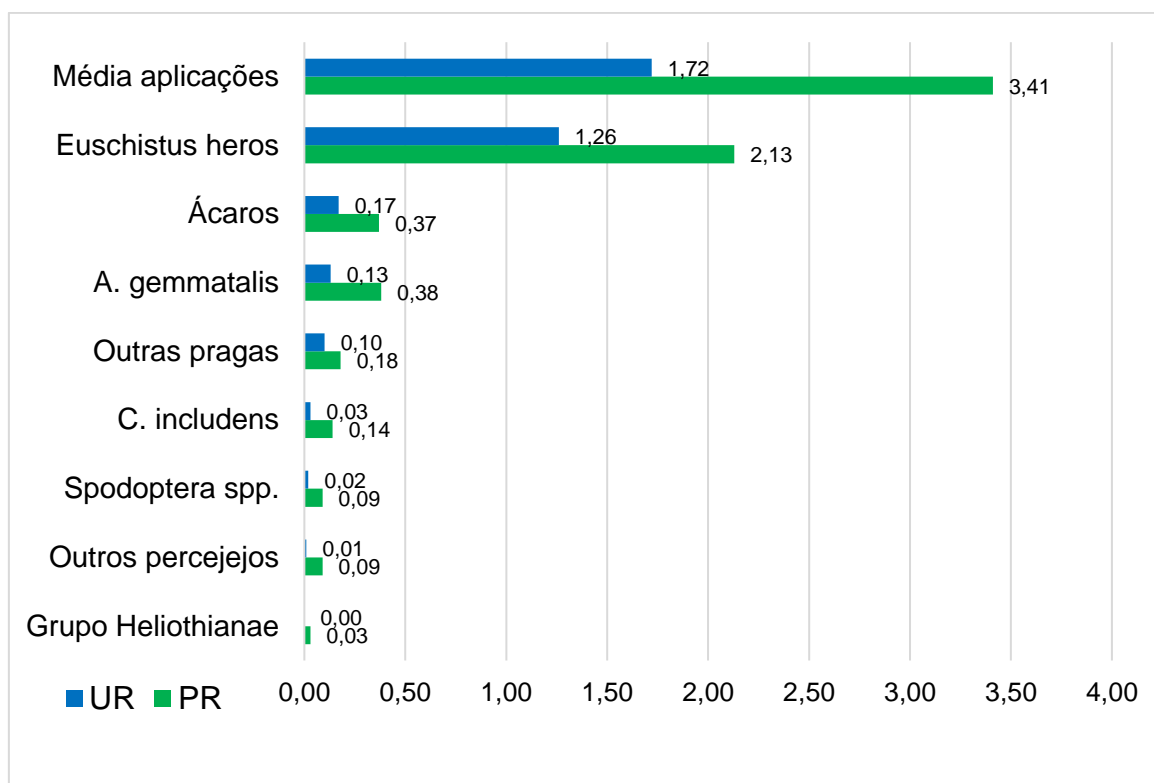


Figura 1. Número médio de aplicações de inseticidas químicos por organismo alvo nas Unidades de Referência (UR) de MIP-Soja e nas áreas convencionais com aplicações calendarizadas (PR), na safra 2020/2021 (CONTE, et al., 2021)****.

Como o maior número de aplicações de inseticidas químicos foi para controlar o *E. heros*, é oportuno analisar algumas opções de CB já identificadas na literatura científica para esse inseto-praga: (1) Macro-biológicos (parasitoides): *Trissolcus basalís* (Hymenoptera:Platygastridae) e *Telenomus podisi* (Hymenoptera: Scelionidae). Em aplicações dos parasitoides de ovos *T. basalís* e *T. podisi* para controle do percevejo-marrom da soja, há relatos de taxa de parasitismo de 60% para *T. basalís* e 80% para *T. podisi* (CORRÊA-FERREIRA, 2007). As vespas de ovos possuem controle em diversos percevejos como *N. viridula*, *E. heros*, *Dichelops melacanthus*, *P. guildinii*, *Thyanta perditor* e *Acrosternum* sp. (EMBRAPA, 2000). Além dos parasitoides de ovos, há também controle biológico de adultos através de vespas *Hexacladia smithii* (Hymenoptera:Encyrtidae) em adultos do percevejo-marrom e mosca de *Trichopoda nitens* (Rhynchota:Nabidae) em adultos

de *N. viridula* (EMBRAPA, 2000). Entretanto, o uso ainda não está disponível comercialmente em larga escala (EMBRAPA, 2019). (2) Microrganismos (fungos entomopatogênicos): *Metarhizium anisopliae* e *Beauveria bassiana*. A eficiência de bioinseticidas à base de *M. anisopliae* e *B. bassiana* para controle de percevejo (*E. heros*) foi avaliada por Oliveira (2017) e apresentaram efeito de patogenicidade e virulência em condições de laboratório. (3) Microrganismos (bactéria): *Chromobacterium subtsugae* é uma bactéria descrita pouco antes de 2007 e que é conhecida por ser tóxica para adultos de percevejos verdes (Heteroptera: Pentatomidae), dentre outros insetos-praga. Em ensaios de laboratório, as toxinas produzidas por essas bactérias eliminaram 100% dos adultos de percevejos verdes em seis dias (MARTIN et al., 2007).

2.11.2 Capacitação em MIP-Soja pelo SENAR-PR

Para a realização do monitoramento das lavouras, é necessário capacitar a mão-de-obra no campo, ou seja, realizar cursos para formar inspetores de campo. O Programa MIP-Soja no Paraná conta com a parceria do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR-PR)³¹, que já atingiu 3.683 participantes em 207 turmas realizadas, como pode ser verificado na Tabela 4.

Tabela 4: Treinamentos sobre MIP-Soja realizados pelo SENAR-PR entre as safras 2016/2017 e 2021/2022 no Paraná.

Ano Safra	Turmas	Participantes Inscritos	Participantes Aprovados	Área total Monitorada (ha)	Média de Aplicação de inseticida
2016-17	18	262	186	2.291,23	1,92
2017-18	28	421	333	3.505,02	1,98
2018-19	43	626	488	4.888,62	1,88
2019-20	61	890	654	6.249,43	1,74
2020-21	53	680	491	6.253,17	1,44
2021-22	67	804	(*)	(*)	(*)
TOTAL	270	3.683	2.152	23.187,47	1,79

Fonte: SENAR-PR (2022). (*) Cursos em andamento.

³¹ SENAR-PR. Curso Manejo Integrado de Pragas (MIP) – Inspetor de campo – Soja. Disponível em <https://www.sistemafaep.org.br/cursos-detahes/?ETNumero=352> Acesso em 20/02/2022.

2.11.2 Soluções para monitoramento

O monitoramento é peça-chave para o sucesso do MIP, pois é através deste serviço que são identificados quais os insetos-praga estão presentes na lavoura, assim como quais os insetos benéficos (inimigos naturais). Muitas AgTechs surgiram no mercado com soluções de monitoramento digital (*scouting*) para ajudar os agricultores a identificar e quantificar as populações de insetos nas lavouras com mais facilidade e precisão. Além de identificar os insetos, as novas soluções de monitoramento digital permitem determinar a densidade populacional, assim como o percentual de desfolha e outros danos. Dependendo do número de pontos de amostragens, é possível identificar até mesmo qual é a direção predominante de entrada das pragas. Com essas informações, é verificado se a quantidade de insetos-praga na lavoura atingiu o NA, identificando qual é o melhor momento para realizar o controle. A seguir, são apresentadas as principais ferramentas de monitoramento de pragas.

2.11.2.1 Pano-de-batida

Trata-se da amostragem mais tradicional, que prevê a utilização de um pano, na cor branca, preso em duas varas, com 1m de comprimento, o qual deve ser estendido entre duas fileiras da lavoura. As plantas da área compreendida pelo pano devem ser sacudidas vigorosamente sobre o pano-de-batida, havendo, assim, a queda das pragas que deverão ser contadas. Esse procedimento deve ser repetido em vários pontos da lavoura, considerando-se a média de todos os pontos amostrados. As amostragens devem ser realizadas nas primeiras horas da manhã (até as 10 horas) ou à tardinha, período de menor atividade dos insetos, possibilitando a sua contagem sobre o pano-de-batida (Embrapa, 2000).

2.11.2.2 Armadilha delta

A armadilha delta plástica é uma armadilha muito usada em programas de monitoramento de mariposas. Fabricada em plástico corrugado com proteção UV, refil de cola e normalmente usadas junto com atrativos como feromônios sintéticos. As

armadilhas funcionam como ferramentas complementares, uma vez que ajudam a identificar a presença do inseto-praga, mas não são apropriadas para estabelecer um parâmetro quantitativo preciso entre o número de insetos capturados na armadilha e a densidade populacional realmente presente na lavoura.

2.11.2.3 Armadilha adesiva amarela

As armadilhas adesivas amarelas são utilizadas para detecção e monitoramento de insetos-pragas (mariposas) em áreas agrícolas e possuem o mesmo adesivo utilizado na cola entomológica. As funcionalidades e as limitações da armadilha adesiva amarela são semelhantes à armadilha delta.

2.11.2.4. Armadilha luminosa

Armadilha luminosa captura insetos que são atraídos pela luz Ultravioleta (UV). É usada com frequência para capturar e monitorar populações de insetos praga. Não é específica, atraindo uma diversidade muito grande de insetos: mariposas, percevejos, cigarrinhas, besouros, mosca, mosquitos, gafanhotos e grilos. O funcionamento é muito simples, a luz UV atrai os insetos, que ao colidirem com as aletas refletoras caem no recipiente coletor. A armadilha deve ser instalada nas partes altas da lavoura, um sensor liga a luz da armadilha a noite e a desliga assim que o dia se inicia. Não há uma recomendação de densidade de armadilhas por hectare, mas pode ser usado como referência 1 armadilha a cada 10 hectares, porém este número pode variar dependendo do tamanho da área e das condições físicas e geográficas.

2.11.2.5 Soluções de monitoramento digital

Um dos maiores desafios na produção de algodão, milho e soja é obter dados localizados, em tempo real, sobre o monitoramento de insetos-praga campo. As soluções de monitoramento digital contemplam o uso de softwares que auxiliam na contagem dos insetos na lavoura ou a captura de imagens por meio de câmeras instaladas em aeronaves ou drones que sobrevoam os talhões, assim como em armadilhas instaladas em diferentes pontos da lavoura. Os dados coletados ou

imagens geradas alimentam uma base de dados, com a determinação da localização via GPS e transmissão das informações colhidas para um sistema. Os dados são analisados com base em algoritmos, gerando informações em tempo real (relatórios ou mapas de calor) sobre a pressão de pragas nos talhões, suportando a tomada de decisão. De acordo com pesquisa realizada pela Embrapa, o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) entre abril e junho de 2020, os agricultores relatam dificuldades para implantar ou melhorar o processo produtivo com a agricultura digital devido principalmente pelo valor do investimento para a aquisição de máquinas, equipamentos ou aplicativos (67,1%); problemas ou falta de conexão em áreas rurais (47,8%); valor para a contratação de prestadores de serviços especializados (44%); falta de conhecimento sobre quais as tecnologias mais apropriadas para o uso na propriedade (40,9%) (Embrapa, SEBRAE e INPE, 2020)³².

2.11.2.5.1 Aparelhos para monitoramento digital de pragas

Os aparelhos coletores (*tablet* ou *smartphone*), são equipamentos que ajudam a automatizar o serviço de monitoramento (*scouting*) no campo e tornam mais eficientes os registros das amostragens em grandes áreas de algodão, milho e soja por meio de aplicativos (APP). Com o uso desses aparelhos coletores (que também operam *off-line*), o “inspetor” percorre um trajeto planejado e registra, com simples toques na tela, as informações em diferentes pontos do talhão, que são georreferenciados (GPS). As análises são feitas por meio de Inteligência Artificial (IA), que compara diferentes resultados, como: (1) Densidade de insetos-praga; (2) Plantas com baixa densidade foliar; (3) Percentual de desfolha ou outros danos na planta; (4) Áreas de menor desenvolvimento. Baseado na análise de dados, o software gera mapas de calor e relatórios que ajudam a identificar os problemas, proporcionando uma visão geral da propriedade com o nível de infestação dos diferentes locais, indicando a quantidade e estádios das pragas encontradas, detalhes da coleta de

³² Embrapa, SEBRAE e INPE (2020). Agricultura Digital no Brasil. Tendências, Desafios e Oportunidades. Resultados de pesquisa online. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1127064/agricultura-digital-no-brasil-tendencias-desafios-e-oportunidades-resultados-de-pesquisa-online> Acesso em 10/02/2022.

cada ponto amostral e histórico da área, aumentando a assertividade na tomada de decisão (FARMBOX, 2022³³; PROTECTOR, 2022³⁴).

2.11.2.5.2 Captura de imagens para monitoramento de pragas

Trata-se de solução de agricultura de precisão para o monitoramento de pragas, capaz de capturar imagens das lavouras com alta resolução e velocidade a partir de aviões ou drones, proporcionando diagnósticos rápidos e precisos para a tomada de decisão. Essa tecnologia digital chega a ser até vinte vezes mais rápida e é capaz de capturar uma quantidade de pontos monitorados até vinte vezes maior que a alternativa de monitoramento digital manual. As imagens aéreas capturadas são armazenadas e analisadas com uso de algoritmos, usando banco de dados que reúnem diversos riscos fitossanitários já identificados para as lavouras (pragas, doenças e plantas daninhas), gerando diagnósticos precisos (mapas) e planos personalizados para tratamento e aplicação localizada. A combinação de imagens de alta definição e inteligência artificial estão ajudando a identificar o NA, visando a adoção de medidas corretivas com precisão e velocidade. Com alto nível de automação, as soluções digitais apresentam potencial para reduzir perdas de produtividade nas lavouras, além de realizar o monitoramento com menor custo por hectare, em áreas agrícolas com maior extensão (StartAgro, 2020³⁵; AgEvolution, 2020³⁶ e Taranis, 2021³⁷).

³³ Fieldview. Farmbox. Por que você deve usar aplicativos para monitoramento de pragas na lavoura. Disponível em <https://blog.climatefieldview.com.br/aplicativos-monitoramento-pragas> Acesso em 22/01/2022.

³⁴ Syngenta Digital. Protector. 5 Motivos Para Investir Em Um Software Para Monitoramento De Pragas Disponível em <https://blog.syngentadigital.ag/software-para-monitoramento-de-pragas/> Acesso em 22/01/2022

³⁵ StartAgro (2020). Disponível em <https://startagro.agr.br/agatech-israelense-taranis-capta-us-30-milhoes/> Acesso em 26/01/2022.

³⁶ AgEvolution (2020). Disponível em <https://agevolution.canalrural.com.br/taranis-recebe-aporte-de-us-30-mi-para-liderar-analise-de-imagem/> Acesso em 26/01/2022.

³⁷ Taranis (2021) Disponível em <https://taranis.ag/pt-br/2021/12/03/taranis-impulsiona-crescimento-no-brasil-com-nova-sede-e-lideranca-brasileira/> Acesso em 26/01/2022.

2.11.2.5.3 Armadilha digital

São armadilhas desenvolvidas para a captura de insetos-praga e que possuem sistema eletrônico integrado. Os insetos-alvo podem ser atraídos por meio de feromônios sintéticos, cor ou outro mecanismo semelhante às armadilhas tradicionais, dependendo das suas características biológicas e cultivo. O aparelho possui câmera que captura imagens de alta resolução dos insetos que ficam presos na placa adesiva. As imagens são enviadas para uma plataforma, onde são analisadas com software de inteligência artificial para identificação e contagem dos insetos-praga. Esses dispositivos podem ter mecanismos para acompanhar o desenvolvimento da população de insetos-praga durante o ciclo do cultivo, além de emitir alertas ao atingir o NA, permitindo controle imediato. O sistema ainda tem capacidade para realizar o registro histórico das infestações, além de cruzar as informações capturadas com dados climáticos (XARVIO, 2021³⁸; METOS, 2021³⁹).

2.12 Desafios do controle biológico no Brasil

Embora seja crescente a adoção de soluções de CB na agricultura brasileira, inclusive em grandes áreas abertas “*open fields*”, o desconhecimento acerca dos benefícios em sustentabilidade e a resistência devido a maior complexidade operacional ainda são obstáculos para os agricultores menos tecnificados, que buscam preferencialmente “menores custos” e “maior comodidade”.

[...] os “sistemas de produção” brasileiros nessas grandes áreas envolvem sucessão e rotação de culturas (soja, milho, algodão, trigo etc.) plantio direto, irrigação, plantas transgênicas (neste caso, mais de 50 milhões de ha) etc., produzindo duas ou três safras por ano, situação completamente diferente de outros locais do mundo (PARRA et al., 2021).

³⁸ MaisSoja (2021). Disponível em <https://maissoja.com.br/xarvio-e-metos-firmam-parceria-no-brasil-para-monitorar-pragas-em-soja-algodao-e-milho-em-tempo-real/>

³⁹ Metos Brasil (2021). iMetos@IScout Disponível em <https://metos.com.br/solucoes/imetos-iscout/> Acesso em 28/01/2022.

2.12.1 Desafios com os macrorganismos (parasitoides e predadores)

De acordo com Parra (2014), ainda existem desafios a serem enfrentados para a utilização do CB como agentes macrobiológicos no Brasil: (1) “Cultura” do agricultor: está acostumado a aplicar inseticida químico e ver o “inseto morto no chão”; (2) Amostragem para liberação: solução de monitoramento das pragas, que alerte o momento correto para liberação do parasitoide; (3) Transferência de tecnologia: iniciativas de extensão rural e treinamentos específicos; (4) Disponibilidade do insumo biológico: aumentar o número de empresas e a capacidade de produção de inimigos naturais; (5) Qualidade do inimigo natural produzido: inseto produzido em laboratório deve ser competitivo com o inseto da natureza e o controle de qualidade é fundamental; (6) Logística de armazenamento e transporte: o parasitoide é carga viva e os cuidados devem considerar as exigências térmicas e de empacotamento, evitando que o inseto chegue morto ao local da liberação; (7) Legislação própria: a atual foi adaptada de leis para químicos e deveria ser específica; (8) Seletividade e manejo de resistência: nos casos em que se aplicam produtos químicos, devem-se usar produtos seletivos, que controle as pragas e preservem os inimigos naturais; (9) Tecnologia de liberação: necessidade de desenvolver e ampliar a capacidade de liberação de inimigos naturais com drones ou aviação agrícola em grandes áreas; (10) Plantas transgênicas: as áreas de refúgios agrícolas podem servir como local de liberação de agentes de CB.

Para macrorganismos (que atuam como parasitoides ou predadores), a disponibilidade dos insetos é fundamental. Como para a produção de inimigos naturais são exigidas criações massais, ou seja, a produção de milhões de insetos, há necessidade de minimizar mão-de-obra e automatizar as criações (PARRA et al., 2021).

2.12.2 Desafios com os microrganismos (entomopatógenos)

A demanda por produtos biológicos a base de microrganismos tem crescido no Brasil, seguindo uma tendência mundial. O principal desafio com esses produtos para CB no país está relacionado com o controle de qualidade. De acordo com a nota

técnica da Embrapa (2021)⁴⁰, houve um aumento do interesse pela produção de insumos biológicos nas propriedades agrícolas para uso próprio, também conhecida como produção “*on-farm*”. Essa produção se dá a partir da replicação de produtos comerciais adquiridos no mercado ou por meio de pré-inóculos preparados e vendidos por empresas especializadas, que também podem comercializar a infraestrutura empregada nesse tipo de produção. Constatações de pesquisadores e técnicos que atuam em regiões agrícolas indicam que a prática é intensa em propriedades produtoras de grãos em diversas regiões do país. Em algumas propriedades que investem em infraestrutura e pessoal especializado, são relatados casos de sucesso. Porém, também há constatações de uso de sistemas de produção precários e ineficientes, resultando em produtos sem qualidade. Frequentemente, os microrganismos alvos de multiplicações não atingem concentrações adequadas. Além disso, ocorre proliferação de contaminantes que resulta em produtos com baixa ou nenhuma eficiência, inclusive com risco de patogenicidade a humanos, animais e plantas. Se por um lado os produtos comerciais precisam seguir processos rígidos para registro e comercialização, com garantia de pureza, concentração e identidade dos microrganismos presentes, na produção “*on-farm*” ainda não existe nenhuma obrigatoriedade quanto ao controle de qualidade. Assim como outros produtos usados na agricultura, a qualidade do produto biológico e sua formulação é essencial para que possa promover os efeitos desejados, tanto para a promoção de crescimento vegetal, quanto para o controle de insetos-praga e doenças. Por fim, com base na literatura, experiência em pesquisa e aplicações legais, a nota técnica da Embrapa destaca três princípios básicos que devem ser observados na produção “*on-farm*”, visando mitigar o risco de que produtos de má qualidade possam denegrir a boa imagem dos bioinsumos, que vem sendo construída ao longo de anos, com perda da confiança do produtor, além de poderem causar danos à saúde e ao meio ambiente: (1) Permitir a multiplicação apenas de microrganismos que constam das listas oficiais do MAPA, ou com especificação de referência, e que sejam adquiridos em bancos de germoplasma reconhecidos como oficiais pelo Ministério; (2) Necessidade de cadastro

⁴⁰ Embrapa. Nota Técnica: Produção de microrganismos para uso próprio na agricultura (on-farm) - Esclarecimentos Oficiais. Disponível em https://www.embrapa.br/esclarecimentos-oficiais/-/asset_publisher/TMQZKu1jxu5K/content/nota-tecnica-producao-de-microrganismos-para-uso-proprio-na-agricultura-on-farm-?inheritRedirect=false. Acesso em 21/01/2022.

de estabelecimento produtor de bioinsumos junto ao MAPA e (3) Necessidade de um responsável técnico habilitado para a produção de bioinsumos nas fazendas.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho se propôs a verificar quais soluções de CB (Controle Biológico) e monitoramento que estão disponíveis atualmente têm potencial para serem utilizadas como ferramentas para o MRI (Manejo de Resistências a Inseticidas) às plantas de algodão, milho e soja GM (Geneticamente Modificada) com tecnologia Bt (com genes de *Bacillus thuringiensis*), para então propor possíveis soluções, como a realização de novas pesquisas, além de desenvolver recomendações de BPA (Boas Práticas Agrícolas) mais atualizadas para evitar ou retardar a ocorrência de tais resistências. A redução do percentual das áreas com o refúgio agrícola estruturadas e manejadas corretamente tem sido um grande desafio em prol da sustentabilidade de plantas GM com proteínas Bt, assim como a disponibilidade de soluções de CB que tenham potencial para superar obstáculos econômicos, operacionais e técnicos no campo.

A hipótese científica de que o uso de controle biológico é uma alternativa viável para o MRI às plantas GM com proteínas Bt ainda parece ser uma proposição especulativa, que para o trabalho foi aceita de forma provisória como ponto de partida para a investigação. A verdade ou refutação da hipótese foi determinada com base na pesquisa em literatura, além de dados de mercado, relatos e experiências realizadas por especialistas em ações de transferência de tecnologia e assistência técnica. Se a hipótese for confirmada, ela se transformará na fundamentação de uma teoria e, caso seja refutada, se transformará em contra-argumento.

O trabalho foi realizado com base em pesquisa de dados secundários (*desk research*), que reuniu informações colhidas em artigos científicos, publicações, documentos, estudos e relatórios já existentes sobre o tema, assim como a legislação pertinente.

3.1 Etapas da coleta de dados

- 3.1.1 Descrição dos benefícios econômicos, ambientais e sociais conquistados devido à alta taxa de adoção das cultivares de algodão, milho e soja GM com tecnologias Bt no Brasil e no mundo;
- 3.1.2 Análise dos impactos econômicos e socioambientais caso a tecnologia Bt perca a sua eficácia nos cultivos de algodão, milho e soja no Brasil, devido a ocorrência de alta frequência de resistência de insetos-praga às proteínas inseticidas nas plantas GM, com base em pesquisas de mercado e depoimentos de especialistas;
- 3.1.3 Descrição e análise das BPA atualmente recomendadas para o MRI às plantas GM de algodão, milho e soja com tecnologias Bt;
- 3.1.4 Identificação das novas soluções disponíveis para o monitoramento e CB de lagartas apontadas como as espécies que apresentam maior risco de evolução de resistência, como *S. frugiperda*, *C. includens* e *H. armigera*, com base no histórico de ocorrências no Brasil e em outros países;
- 3.1.5 Evidências da ocorrência de casos de resistência às plantas geneticamente modificadas com tecnologias Bt nas lavouras de algodão, milho e soja, analisando qual é a tendência de crescimento do problema devido às condições favoráveis da agricultura tropical e o consequente aumento da pressão no sistema produtivo;
- 3.1.6 Análise da taxa de adoção das áreas de refúgio agrícola em conformidade nas lavouras de algodão, milho e soja GM com tecnologia Bt e as razões pelas quais os agricultores estão utilizando (ou não) em suas lavouras, com base em pesquisas de mercado disponíveis e em depoimentos de especialistas e agricultores;
- 3.1.7 Mapeamento das novas soluções de controle biológico disponíveis no mercado ou em fase final de desenvolvimento (pré-marketing) e que poderão ser utilizadas no manejo de resistências de insetos às plantas de algodão, milho e soja com tecnologia Bt;
- 3.1.8 Verificação dos aspectos econômicos, operacionais e técnicos das soluções de CB, assim como os desafios e oportunidades para adicioná-las às atuais recomendações de MRI nas lavouras de algodão, milho ou soja GM com tecnologia Bt;

3.1.9 Análise sobre o conteúdo dos cursos e materiais educativos sobre MIP (Manejo Integrado de Pragas), visando ampliar as ações para difusão de conhecimentos e transferência de tecnologia sobre CB e MRI nos cultivos GM com tecnologia Bt.

3.2 Análise de dados (delineamento)

Como o estudo é abrangente e envolve três importantes cultivos em diversas regiões agrícolas no Brasil (algodão, milho e soja), diversas lagartas (p.e. *S. frugiperda*, *C. includens* e *H. armigera*, dentre outras), diversas possibilidades de controle biológico (entre microbiológicos, macrobiológicos e semioquímicos), com possibilidade de tratamento em área total (área com plantas Bt + área de refúgio com plantas não-Bt), área com plantas Bt e área de refúgio (com plantas não-Bt), reunidos na Tabela 5, foi necessário fazer um delineamento para analisar especificamente a combinação de algumas poucas soluções, tendo em vista que o grande número de possibilidades.

Tabela 5: Possíveis combinações e soluções com controle biológico em plantas GM com tecnologia Bt.

CULTIVOS	LAGARTAS	BIOLÓGICOS	ÁREA TRATADA
1. Algodão	1. <i>A. gemmatalis</i>	1. Macrobiológicos	1. Área total (plantas Bt + refúgio não-Bt),
2. Milho	2. <i>C. includens</i>	2. Microbiológicos	2. Área com plantas Bt
3. Soja	3. <i>E. lignosellus</i>	3. Semioquímicos	3. Área de refúgio (não-Bt),
	4. <i>H. armigera</i>		
	5. <i>P. gossypiella</i>		
	6. <i>S. frugiperda</i> ,		
	7. ...		

Tendo em vista a relevância econômica, assim como a maior disponibilidade de dados, o presente trabalho concentrou as análises no cultivo de soja, nas lagartas *C. includens*, *H. armigera* e *S. frugiperda* e em soluções para as áreas de refúgio agrícola (não-Bt), cuja taxa de adoção das áreas em conformidade precisaria aumentar substancialmente nas próximas safras.

3.2 Propostas com possíveis soluções

A pesquisa se propôs avaliar quais as soluções possíveis, utilizando métodos de comprovação para reunir e verificar se existem suposições cabíveis como resposta ao problema do MRI nos cultivos GM de algodão, milho e soja com proteínas Bt, realizando: (a) Pesquisa bibliográfica, (b) Análise qualitativa, conceitual e comparativa e (c) Entrevistas e depoimentos de especialistas.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Benefícios da biotecnologia

De acordo com relatório da ISAAA (2019)⁴¹, as culturas biotecnológicas contribuíram para a segurança alimentar, sustentabilidade e soluções para mitigar os impactos das mudanças climáticas:

- Aumentando a produtividade das culturas em 822 milhões de toneladas avaliadas em US\$ 224,9 bilhões entre 1996-2018;
- Conservando a biodiversidade entre 1996 e 2018, economizando 231 milhões de hectares de terra;
- Proporcionando um ambiente melhor, por meio da economia de:
 - 776 milhões de quilogramas de ingrediente ativo de defensivos agrícolas deixaram de ser lançados no meio ambiente entre 1996 e 2018;
 - reduziu em 8,3% o uso de pesticidas entre 1996 e 2018;
 - reduzindo o Quociente de Impacto Ambiental (*EIQ, Environmental Impact Quotient*, em inglês) em 18,3% entre 1996 e 2018.
- Reduzindo as emissões de CO₂ em 2018 em 23 bilhões de quilogramas, o equivalente a retirar 15,3 milhões de carros da estrada por um ano;
- Ajudando a reduzir a pobreza, melhorando a situação econômica de 16 a 17 milhões de pequenos agricultores e suas famílias, totalizando mais de 65 milhões de pessoas mais pobres no mundo (BROOKES, 2020).

Assim, os cultivos com biotecnologia podem contribuir para uma estratégia de “intensificação sustentável” suportada por academias de ciências em todo o mundo, o

⁴¹ The International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA). Disponível em <http://www.isaaa.org>. Acesso em 21/01/2022.

que permite que a produtividade e a produção possam aumentar nos atuais 1,5 bilhão de hectares de terras agrícolas globais, conservando as florestas e biodiversidade. Os cultivos com biotecnologia são essenciais, mas não são uma panaceia, pois também exigem a adoção de boas práticas agrícolas, como a rotação de cultivos, MIP, CB, áreas de refúgio (não-Bt) e o manejo de resistências, da mesma forma que os cultivos convencionais.

A principal forma sobre como as plantas GM com tecnologia Bt estão beneficiando o meio ambiente é a redução do uso de inseticidas registrada entre 1996 e 2018, efetivamente substituindo os inseticidas usados para controlar lagartas nas lavouras. Em 2018, a soja GM com tecnologia Bt estava em seu sexto ano de uso comercial na América do Sul (principalmente no Brasil). Durante este período (2013-2018), a economia no uso de inseticida (ingrediente ativo) em relação a quantidade que se utilizava historicamente na área de cultivo, quando era plantada com soja convencional, foi de 14,9 milhões de kg (8,2% do total do uso de inseticida na soja), com um benefício ambiental adicional, medido pela redução do quociente de impacto ambiental (EIQ) de 8,6 (BROOKES; BARFOOT, 2020).

4.2 Impactos econômicos e socioambientais, se houver perda da tecnologia Bt

No contexto agrícola, a evolução da resistência tem sido identificada como uma das mais sérias ameaças ao desenvolvimento e à manutenção de práticas de MIP (LABBE et al., 2005). Nos últimos anos surgiram relatos sobre o aumento da população de insetos-alvo resistentes às proteínas Bt, determinando questionamento quanto a eficácia da tecnologia no controle dessas pragas. Como o ganho de produtividade propiciado pelas sementes resistentes a insetos está diretamente relacionado à redução do risco produtivo, uma vez que a tecnologia busca justamente diminuir os danos potenciais ocasionados pelas pragas-alvo, a perda de eficácia tende a refletir no desempenho da lavoura (com a queda do diferencial de produtividade) e também no manejo de pragas (com aplicação de mais inseticidas). Em um cenário de aumento da população de insetos resistentes não controlados pela tecnologia Bt, os benefícios econômicos e socioambientais diminuirão com o passar do tempo e poderão até mesmo ser perdidos (AGROCONSULT, 2018).

O MRI às plantas transgênicas com proteínas inseticidas Bt, principalmente por meio das áreas de refúgio agrícola (não-Bt), é de fundamental importância para evitar a perda da eficácia agrônômica da tecnologia, que como consequência pode resultar na redução da produtividade e no aumento dos custos nas lavouras de algodão, milho e soja, dada a alta taxa de adoção de cultivares GM.

Sem a adoção de medidas eficazes para evitar ou retardar a ocorrência do problema de resistência de insetos às plantas GM com proteínas Bt, o agricultor pode acabar enfrentando consequências que aumentarão os custos de produção e os impactos negativos, tais como: (a) aplicações mais frequentes de inseticidas químicos; (b) uso de doses acima da recomendada pelo fabricante; (c) maior risco de contaminação ambiental; (d) desequilíbrio biológico; (e) risco de ultrapassar o Limite Máximo de Resíduos (LMR); (f) uso de mistura de inseticidas e (g) a não rotação dos modos de ação dos inseticidas. Além dos impactos negativos listados, outros problemas podem comprometer o programa de MIP, a competitividade e a sustentabilidade da produção de algodão, milho e soja no Brasil.

A tecnologia Bt no milho provocou, especialmente para a lagarta-do-cartucho (*S. frugiperda*), uma revolução no campo. Essa é, para várias culturas, uma das pragas de mais difícil manejo. Trata-se de um inseto difícil de manejar na cultura do milho, pelo fato de ter um ciclo de vida muito curto e dificuldade da determinação do momento certo para a aplicação de inseticida. A introdução do milho Bt resolveu esse problema. Antes, eram necessárias 4,5 aplicações de inseticidas, e havia problemas com resistência a alguns grupos químicos de inseticidas. Com a introdução do milho Bt, o problema foi resolvido. Com o uso do milho Bt, a resistência aos inseticidas não ocorreu por um bom tempo assim como a necessidade de monitorar as lavouras para as aplicações. Tanto é que depois de alguns casos de resistência à tecnologia, o agricultor voltou a aplicar inseticidas químicos para controlar lagartas e ele já não estava mais habituado a ter que monitorar a área e aplicar inseticidas no momento correto. Se a adoção do refúgio agrícola estruturado não ocorrer, conforme recomendado, o mercado poderá perder as tecnologias Bt. Em um segundo momento, será necessário voltar a usar o controle químico. Este método de controle, além de ser mais caro, é mais difícil de executar. Não apenas pelos custos dos inseticidas, mas também das máquinas, o diesel e a necessidade de entrar mais vezes na lavoura para pulverizar. Além disso, o controle químico não determina 100% de controle, pois

sempre há falhas e perdas em função do manejo. Consequentemente, resultará na elevação dos custos e na redução da produtividade (FARIAS, 2021)⁴².

Como não há nenhuma legislação que obrigue o produtor que usa tecnologia Bt a adotar as áreas de refúgio (não-Bt), as empresas detentoras da tecnologia desenvolvem ações de conscientização e incentivo para que todos os agricultores que usam a tecnologia Bt, cultivando plantas GM, adotem o refúgio com plantas não-Bt. Quando o agricultor opta por não implementar o refúgio, acaba induzindo o aumento da população de insetos-praga resistentes e, por consequência, o risco da perda de eficácia da tecnologia Bt, que pode ocorrer após algumas gerações de indivíduos resistentes. Além disso, ao não adotar a área de refúgio, o agricultor pode prejudicar as propriedades próximas que usam tecnologia Bt e tenham seguido corretamente as recomendações.

Para tentar minimizar ou reverter a situação, as empresas vêm investindo em pesquisa e desenvolvimento para a identificação de novas proteínas ou ativos com característica inseticida que sejam efetivos contra pragas. Além disso, as empresas vêm focando no desenvolvimento de materiais que passam a incorporar mais de um gene (piramidação)⁴³ para que cada um produza diferentes proteínas inseticidas, com modos de ação únicos e independentes, como ferramenta de manejo de resistência, visando maior durabilidade das tecnologias. No entanto, o processo de desenvolvimento de um novo Organismo Geneticamente Modificado (OGM) Resistente a Insetos (RI) é lento e bastante custoso. De acordo com dados da Phillips Mc Dougall (2011)⁴⁴, o investimento necessário para desenvolver uma nova tecnologia transgênica é de US\$136 milhões e o tempo para aprovar o uso é de até 13 anos,

⁴² CropLife Brasil (2021). FARIA, J. O milho Bt no Brasil: não podemos esquecer da revolução que ele provocou na cultura. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/noticias/o-milho-bt-no-brasil/>. Acesso em 10/09/2021.

⁴³ O princípio básico da piramidação de genes é que cada proteína inseticida da pirâmide, isoladamente, deve ocasionar elevada mortalidade da mesma praga-alvo. Em outras palavras, cada proteína Bt deve matar todos ou a maioria dos insetos suscetíveis; ou seja, esses insetos serão mortos “duas vezes”, sendo isso denominado de controle “redundante”. Em contraste, os insetos resistentes a uma das proteínas da pirâmide serão mortos pela(s) outra(s) proteína(s) e vice-versa (Bates et al., 2005). Disponível em https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA_13_Protecao_plantas-artigo3.pdf pp 108. Acesso em 25/09/2021.

⁴⁴ CropLife. Phillips McDougall (2011). The cost and time involved in the discovery, development and authorization of a new plant biotechnology derived trait. Disponível em <https://croplife.org/wp-content/uploads/2014/04/Getting-a-Biotech-Crop-to-Market-Phillips-McDougall-Study.pdf> Acesso em 20/02/2022.

podendo criar uma lacuna e deixar os agricultores brasileiros sem uma alternativa tão eficaz para controlar lagartas como a tecnologia Bt (AGROCONSULT, 2018). De acordo com a Agroconsult (2018), a dificuldade em conscientizar o produtor rural sobre a importância do refúgio decorre do fato de que sua adoção traz benefícios mais claros no futuro. Se forem avaliados os benefícios imediatos, pode-se optar por não adotar a recomendação de plantar o refúgio por receio que a boa prática acarrete prejuízos econômicos e gere dificuldades operacionais. Sem a visão de longo prazo, o agricultor não consegue mensurar o prejuízo que essa atitude pode trazer para o negócio, dado que as plantas perderiam sua proteção contra os insetos-praga. Além da dimensão temporal, a decisão sobre implementar ou não a área de refúgio também passa por questões que envolvem o chamado dilema da ação coletiva, conceito concebido por Olson, em 1999. De maneira resumida, problemas de ação coletiva surgem na medida em que os indivíduos procuram maximizar sua própria utilidade e desviam do comportamento cooperativo. A opção pela deserção é favorecida pelo fato de o agente não perceber a importância da sua contribuição individual para o bem coletivo. Ademais, sua transgressão muitas vezes nem é passível de ser identificada pelos demais, pelo fato de ser muito reduzida dado a população como um todo. Ao final, a decisão de privilegiar os interesses individuais acaba sendo predominante, fazendo com que o resultado para o bem coletivo seja insuficiente ou desastroso. Para contornar a situação e favorecer o comportamento cooperativo, Olson (1999) propõe a criação de incentivos seletivos negativos e positivos por meio de mecanismos de monitoramento.

4.3 Ecossistema de inovação

De acordo com relatório do Radar Agtech Brasil 2019, um estudo realizado pela Embrapa, SP Ventures e Homo Ludens sobre as startups que operam no agronegócio brasileiro, foram identificadas 1.125 (DIAS et al., 2019). No relatório Radar Agtech Brasil 2020/2021, foram mapeadas 1.574 Agtechs e mais de 20 *hubs* de inovação agropecuária no país, 32 startups de CB e MIP, 39 startups de Internet das Coisas e 79 startups de drones, máquinas e equipamentos, o que mostra que o ecossistema de inovação agropecuária brasileiro progrediu e é um dos mais dinâmicos do mundo (FIGUEIREDO, 2021). Dentre tantas startups mapeadas, foram destacadas três categorias para o presente trabalho: (1) Internet das coisas, que

atuam com soluções para o monitoramento de pragas, coleta de informações sobre o solo, clima e irrigação. Tais empresas desenvolvem e disponibilizam equipamentos e sensores capazes de coletar e transmitir automaticamente informações entre aparelhos. (2) Drones, que reúne empresas que desenvolvem e disponibilizam Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para capturar imagens ou aplicar insumos agrícolas nas fazendas, dentre os quais destaca-se a liberação de agentes microbiológicos e a pulverização de defensivos agrícolas com precisão. (3) CB e MIP, que desenvolvem e/ou comercializam semioquímicos, agentes microbiológicos ou microbiológicos, para controle de pragas e doenças, bem como tecnologias para o manejo fitossanitário e outros bioinsumos para melhorar a saúde das lavouras.

4.3.1 Internet das coisas e o monitoramento de pragas

O monitoramento da lavoura, a identificação correta das pragas e dos inimigos naturais, assim como o conhecimento do estágio de desenvolvimento da planta e dos níveis de ação são importantes componentes do MIP e de MRI. O MIP orienta na tomada de decisões de controle de pragas com base num conjunto de informações sobre os insetos e sua densidade populacional, na ocorrência de inimigos naturais e na capacidade da cultura de tolerar os danos (HOFFMANN, 2000).

A Agricultura de Precisão (AP) é um sistema completo de gerenciamento da produção agrícola, visando otimizar o uso de insumos, como sementes, água, fertilizantes, corretivos, defensivos agrícolas, entre outros, considerando o mapeamento da variabilidade espacial e temporal das áreas de manejo (PIRES et al., 2004; PRADO, 2018). Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas computacionais que gerenciam dados georreferenciados, ou seja, pontos localizados geograficamente por meio de GPS, sigla em inglês que significa Global Position System (SILVA, MANN, 2020). Desse modo, ficou possível criar novas modelagens e simulações a partir da modificação do nível de informações e da integração de dados de diferentes naturezas, para gerar ideias e soluções mais adequadas para cada talhão da lavoura (FILIPPINI ALBA, 2014; GREGO et al., 2014; BUDIHARTO et al., 2019). A adoção de soluções de monitoramento digitais de insetos-praga nas lavouras de algodão, milho e soja estão crescendo rapidamente, pois proporciona benefícios econômicos e operacionais tangíveis para os produtores. Uma única ferramenta de

monitoramento desenvolvida por uma AgTech brasileira que foi adquirida por uma empresa multinacional de proteção de plantas em 2018, divulga que está operando atualmente em mais de 4 milhões de hectares de mais de 3 mil fazendas em 8 países do mundo.

Em 2019, o Brasil já havia atingido a marca de 230 milhões de celulares inteligentes (smartphones) em uso e, quando somados aos notebooks e tablets, já totalizavam 324 milhões de dispositivos portáteis ou 1,6 dispositivos por habitante (MEIRELLES, 2019). O agricultor brasileiro não está fora desse contexto. Os produtores de algodão, milho e soja estão inseridos em cadeias de commodities, onde o lucro líquido por unidade de área está historicamente diminuindo. A viabilização econômica das propriedades rurais requer, cedo ou tarde, a intensificação produtiva com aplicação de tecnologia e adoção de pacotes cada vez mais dependentes de conectividade e automação (MAPA, 2021)⁴⁵. Com a conclusão do leilão que selecionou as empresas que vão operar a tecnologia 5G no Brasil em novembro de 2021, o país ampliará as áreas de cobertura e intensificará o uso das soluções digitais no campo, inclusive o uso de ferramentas para o monitoramento de pragas. De acordo com o Secretário de Telecomunicações do Ministério das Comunicações (MCOM, 2021)⁴⁶, Artur Coimbra de Oliveira, o edital traz uma série de compromissos a serem obedecidos e assumidos pelas empresas, sendo um deles a cobertura das 9.600 localidades rurais, a cobertura dos 48 mil quilômetros de rodovias federais com banda larga de alta velocidade, além do atendimento a todas as cidades brasileiras com o 5G *standalone*, que é o 5G mais veloz que existe. O edital prevê que as empresas vencedoras terão que instalar antenas 5G em municípios com menos de 30 mil habitantes até o final de 2029.

⁴⁵ MAPA (2019). Cenários e perspectivas da conectividade para o agro. Disponível em <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/conectividade-rural/livro> Acesso em 14/02/2022.

⁴⁶ MCOM (2021). Tecnologia 5G vai revolucionar e desenvolver áreas como agropecuária, saúde e educação no Brasil. Disponível em <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/11/tecnologia-5g-vai-revolucionar-e-desenvolver-areas-como-agropecuaria-saude-e-educacao-no-brasil> Acesso em 14/02/2022.

4.3.2 O uso de drones em agricultura de precisão

O desenvolvimento dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) surgiu como uma importante opção na Agricultura de Precisão (AP). Sua aplicação na agricultura e em missões de reconhecimento vem sendo favorecida e facilitada pelo atual estágio de desenvolvimento tecnológico, principalmente pela redução do custo e do tamanho dos equipamentos e pela necessidade de otimização da produção (JORGE; INAMASU, 2014). De acordo com Lambarelli (2016), a AP é definida como um conjunto de técnicas que permitem fazer um manejo localizado nos cultivos, prevendo a otimização dos insumos da produção, utilizando técnicas que buscam o melhor rendimento da cultura, seguindo alguns aspectos como localização, fertilidade do solo, entre outros fatores. A utilização de drones na liberação de agentes de controle microbiológicos ou pulverização de defensivos agrícolas, tem proporcionado uma operação mais eficiente, considerando a qualidade e a precisão da aplicação, a redução de custos, a melhora na produtividade e a economia de tempo para realização da atividade. Com a publicação da Portaria No. 298, de 22/09/2021, o MAPA estabeleceu as regras para operação de aeronaves remotamente pilotadas destinadas à aplicação de defensivos agrícolas químicos e biológicos, adjuvantes, fertilizantes, inoculantes, corretivos e sementes, tornando o Brasil o primeiro país da América Latina que estabeleceu regras modernas para operação de drones destinados à aplicação de insumos na agricultura. Trata-se de um avanço, que certamente vai contribuir para tornar a AP mais acessível para os agricultores brasileiros. A tecnologia dos drones já está ajudando o país na sua jornada de profissionalização da agricultura, por meio dos cursos de capacitação dos operadores e da democratização do acesso às novas tecnologias digitais, mais seguras e sustentáveis.

4.3.3 Controle biológico e MIP

Os bioinseticidas são considerados uma importante ferramenta para o manejo da resistência de insetos às moléculas químicas e às proteínas Bt, trazendo mais sustentabilidade às lavouras. A expansão do CB, através da viabilização econômica da produção comercial do baculovírus, do desenvolvimento de soluções a base de semioquímicos, feromônios, insetos transgênicos autolimitantes e da produção de

parasitoides em biofábricas, assim como a liberação de genótipos tolerantes às principais pragas, estão entre as principais oportunidades de expansão e consolidação do MIP em algodão, milho e soja (HOFFMANN, 2000).

Apesar dos desafios já listados, a conjuntura atual é mais favorável ao crescimento do mercado de CB no Brasil e no mundo do que no início dos anos 2000, pois além da maior exigência dos consumidores pela adoção de soluções mais sustentáveis ao longo da cadeia produtiva de alimentos, fibras e energia limpa, podemos adicionar os seguintes pontos: (1) baixo nível de resíduos dos produtos de CB nos alimentos e no ambiente; (2) redução da eficácia de diversos inseticidas químicos tradicionais, principalmente pela alta pressão de seleção exercida sobre os insetos-praga; (3) aumento dos processos de detecção, análise, monitoramento e rastreabilidade de defensivos químicos nas colheitas; (4) avanço tecnológico nos processos desenvolvimento de novos produtos para CB (viabilidade, pureza e estabilidade e eficácia); (5) ampliação dos estudos de compatibilidade entre os produtos microbiológicos e defensivos agrícolas químicos (FONTES; VALADARES, 2020).

De acordo com Lars Schobinger⁴⁷, sócio-diretor da consultoria Blink Projetos Estratégicos, “aqueles produtores que, de alguma forma, já adotam o controle biológico no manejo de pragas correspondem a uma área de 20% do total cultivado no país”. A pesquisa realizada pela consultoria Blink (2021) para a CropLife Brasil, revela que um terço das demandas de proteção e saúde das plantas já podem ser atendidas – em parte ou totalmente – por produtos biológicos. Com o crescimento do mercado, impulsionado pela indústria, e a busca dos produtores por soluções mais sustentáveis, o país deve ter de 66% a 75% das soluções de manejo atendidas por CB nos próximos anos. Na Tabela 6, estão mapeadas as possíveis soluções de CB para MRI a Lepidópteros (Noctuidae), em cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt.

⁴⁷ Blink (2021). Lars Schobinger. Revista Globo Rural. Mercado de defensivos biológicos deve crescer mais de 50% no Brasil em 2021. Disponível em <https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Sustentabilidade/noticia/2021/05/mercado-de-defensivos-biologicos-deve-crescer-mais-de-50-no-brasil-em-2021.html> Acesso em 13/02/2022.

Tabela 6: Possíveis soluções de CB para MRI a Lepidópteros (Noctuidae), em cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt.

Classificação	Produto Biológico
Microbiológico	Baculovirus (diversos vírus entomopatogênicos)
Semioquímico	Voláteis de plantas + inseticida (atrai-e-mata)
Semioquímico	Feromônio de confusão sexual
Macrobiológico	<i>Trichogramma pretiosum</i>
Macrobiológico	Machos GM de <i>S. frugiperda</i> com gene autolimitante

Fonte: Autor.

4.4 Resistência em algodão, milho e soja GM com tecnologias Bt

Apesar do sucesso das culturas GM com tecnologia Bt, inúmeras espécies de pragas estão desenvolvendo níveis crescentes de resistência aos produtos biológicos a base de Bt e às toxinas Cry expressas em culturas GM (TABASHNIK et al., 2008; GASSMANN et al., 2011; KRUGER et al., 2011; TABASHNIK et al., 2009; ZHANG et al., 2011, 2012; STORER et al., 2012).

4.4.1 Ocorrências em algodão

Dados relatados por Duhra e Gujar (2011), constituem a primeira evidência de resistência desenvolvida em campo da lagarta rosada (*P. gossypiella*) à proteína Cry1Ac em algodão. A evidência detectada em 2008 estimulou avaliações mais aprofundadas durante a safra 2009/2010, que confirmou a resistência da lagarta à proteína Cry1Ac, cultivada no distrito de Amreli de Gujarat, no oeste da Índia. A Concentração Letal média (CL₅₀) de Cry1Ac para larvas de cinco dias de idade foi significativamente maior para insetos coletados em 2008 em Amreli do que para qualquer outra população coletada em quatro diferentes locais na Índia. Para Cry1Ac, a média de CL₅₀ para a cepa coletada em Amreli foi 44 vezes maior do que para a população mais suscetível de outras regiões. No entanto, não foi detectada a resistência cruzada à proteína Cry2Ab2, sugerindo que as plantas GM que produzem esta toxina são provavelmente mais eficazes contra as populações resistentes do que as plantas GM que produzem apenas a proteína Cry1Ac. Dessa forma, essa

população de lagartas não demonstrou resistência cruzada ao algodão piramidado que expressa às proteínas Cry1Ac/Cry2Ab2 (DUHRUA; GUJAR, 2011).

4.4.2 Ocorrências em milho

Casos de resistência de lagartas ao milho GM com tecnologia Bt já foram publicados em trabalhos científicos que registraram a ocorrência de populações da lagarta do cartucho resistentes à proteína Cry1F (milho Herculex) nas regiões do oeste da Bahia, onde os autores verificaram que os alelos de resistência estão distribuídos por populações de diferentes regiões do País. A ocorrência de resistência à proteína Cry1F expressa em milho Herculex para *S. frugiperda* foi detectada em menos de quatro anos de uso dessa tecnologia no Brasil (Farias et al., 2014). Nos Estados Unidos, foi registrada ocorrência de resistência à mesma proteína, Cry1F (milho Herculex), em trabalho publicado por Huang et al. (2014). No Brasil, a evolução da resistência a proteína Bt foi reportada em *S. frugiperda* a tecnologia de milho Bt com a proteína Cry1Ab (OMOTO et al., 2016).

4.4.3 Ocorrências em soja

Estudos realizados pela Embrapa Soja (2021) têm demonstrado que populações de *Rachiplusia nu*, espécie muito semelhante a *C. includens*, coletadas nos estados do Paraná e São Paulo possuem capacidade de se desenvolver em variedades de soja-Bt de primeira geração. Resultados iniciais indicam a evolução de resistência em nível de campo de populações de *R. nu* à soja-Bt expressando Cry1Ac. Outro lepidóptero, cuja populações também sem sido relatadas ocorrendo em soja-Bt de primeira geração é a broca-das-axilas, *Crociosema aporema* (Walsingham) (Lepidoptera: Tortricidae). A ocorrência de *C. aporema* em soja-Bt de primeira geração tem sido constatada mais acentuadamente na região centro-norte do estado do Paraná e sul do estado de São Paulo além da região do entorno do Distrito Federal (PAD-DF). A incidência dessa praga observada durante a safra 2020/21 indica a possibilidade de resistência da espécie a soja Bt de primeira geração expressando

Cry1Ac (EMBRAPA SOJA, 2021)⁴⁸. Entre as causas que podem ter favorecido este processo está a baixa adoção do refúgio agrícola estruturado e as aplicações de inseticidas sem levar em consideração os NA nas áreas que não adotam o MIP (REVISTA CULTIVAR, 2021)⁴⁹.

4.5 Taxa de adoção das áreas de refúgio agrícola

O uso intensivo e continuado de plantas geneticamente modificadas com tecnologias Bt em grandes extensões de áreas de algodão, milho e soja sem a ampla adoção de área de refúgio agrícola pelos agricultores, está aumentando a pressão de seleção de insetos resistentes, assim como o risco da perda de eficácia agrônômica das proteínas Bt. De acordo com o painel Amis da Kleffmann, apenas 16% da área total plantadas de milho verão na safra 2017/2018 apresentava o uso correto do refúgio agrícola. A série histórica (desde 2012), que soma a área de milho verão e segunda safra, mostra que 2015 foi o ano com maior percentual de adoção da área de refúgio. Nos demais períodos, a variação foi entre 17 e 25% (Revista KLFF, 2018)⁵⁰. A média das áreas de soja Bt no Brasil que adotaram refúgio agrícola (não-Bt) e estão em conformidade com as recomendações de boas práticas, reduziu de 82,1% na safra 2014/15 para 21,4% na safra 2019/2020 (HORIKOSHI et al., 2021).

O próprio crescimento da taxa de adoção de cultivares GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt, contribuíram, indiretamente para a redução das áreas de refúgio nas últimas safras. Nas primeiras safras da tecnologia Bt em campo, quando as participações de cultivares Bt de algodão, milho e soja ainda eram pequenas, de forma inconsciente, o produtor plantava percentuais acima de 20% de cultivares não Bt, situação que contribuía para redução da pressão de seleção e do risco ocorrência de resistência. Devido à alta eficácia, facilidade de uso e alta produtividade de

⁴⁸ Nota Técnica - Embrapa Soja Ocorrência de *Rachiplusia nu* e *Crociosema aporema* em soja-Bt na safra 20/21 e principais orientações de manejo aos produtores para a safra 21/22. Disponível em: https://www.embrapa.br/documents/1355202/0/Nota+t%C3%A9cnica_Rn+e+Ca_final.pdf/2cb6b42d-7b38-cd9f-5e71-04efabe75262 . Acesso em 26/09/2021.

⁴⁹ Revista Cultivar. Preservação da biotecnologia Bt. Página 36, 13/09/2021. Adeney de Freitas Bueno, Embrapa Soja; Débora Mello da Silva, Faped/Embrapa. Soja. Disponível em <https://revistacultivar.com.br/materias/preservacao-da-biotecnologia-bt> Acesso em 24/01/2022.

⁵⁰ Revista KLFF – 16a Edição. O milho Bt está na berlinda? Milho: Tecnologia Bt: Até quando? Página 14. 2018. Disponível em: <http://portalkynetec.com.br/RevistaKLFF/Edicao-16> Acesso em 04/10/2021.

cultivares GM com tecnologia Bt, sua taxa de adoção cresceu rapidamente. Com a expansão do uso de cultivares GM com tecnologia Bt, as “áreas de refúgio involuntários” decresceram. Em algumas regiões, verifica-se que as áreas com cultivares não Bt estão bem abaixo de 20, 10 e 20% recomendados para refúgio nos cultivos de algodão, milho e soja, respectivamente, aumentando a pressão de seleção e impondo risco maior de ocorrência de resistência à tecnologia Bt. Neste cenário, com a baixa taxa de adoção das áreas de refúgio (não-Bt) em conformidade nos cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt, a resistência cruzada é uma ameaça ao manejo fitossanitário desses sistemas produtivos. No campo, a resistência de *S. frugiperda* ao milho GM com tecnologia Bt já está afetando a eficácia do algodão Bt e da soja Bt devido à resistência cruzada resultante de proteínas Bt compartilhadas ou semelhantes entre as tecnologias nesses cultivos (HORIKOSHI, 2016; MACHADO, 2020).

4.5.1 Razões para a baixa adoção do refúgio agrícola

Os cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt precisam manter uma área de refúgio agrícola com plantas não-Bt. A falta dessa medida preventiva acaba aumentando a pressão de seleção de insetos-praga resistentes, com risco de tornar ineficaz a ação desejada das plantas GM com tecnologia Bt. É consenso entre os especialistas, consultores e pesquisadores que a área de refúgio é a principal estratégia que os produtores de algodão, milho e soja têm atualmente para evitar a quebra de resistência das plantas GM com tecnologia Bt, conservando a sustentabilidade e a produtividade das lavouras (EMBRAPA, 2015)⁵¹.

Como demonstrado no painel Amis da Kleffmann (2018) e por Horikoshi, Bernardi e Godoy (2021), a taxa de adoção das áreas de refúgio pelos agricultores é decrescente. Em entrevistas com consultores que atendem produtores de algodão, milho e soja mais tecnificados, eles relatam questões de ordem econômica, operacional e técnica para a baixa adoção das áreas de refúgio, onde os três principais motivos identificados junto aos agricultores são: (1) dificuldade para encontrar sementes não-Bt com o mesmo ciclo e potencial produtivo das sementes com

⁵¹ Embrapa (2015). Cientistas alertam para a importância da área de refúgio no controle de pragas. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2421997/cientistas-alertam-para-a-importancia-da-area-de-refugio-no-controle-de-pragas>. Acesso em 22/01/2022.

tecnologia Bt; (2) maior complexidade na operação da lavoura, que requer ajustes nas máquinas e tratos culturais diferenciados para as áreas não-Bt; (3) manejo de pragas em áreas não-Bt é diferente e a severidade dos danos causados pelas pragas é maior, com risco de afetar a rentabilidade. Relatos de produtores que resistem em adotar as áreas de refúgio encontram amparo na falta de uma regulamentação que determine a obrigatoriedade da adoção das áreas de refúgio em lavouras GM com tecnologia Bt no Brasil (APROSOJA, 2017)⁵².

4.5.2 Entendimento e conscientização sobre refúgio agrícola

De acordo com pesquisa realizada de forma presencial com 384 agricultores, no estudo “Inovação no Agronegócio e a qualificação do produtor brasileiro na era digital”, divulgado pela CropLife e Ernst Young (2021)⁵³, entre os entrevistados que trabalham com algodão, milho e soja (122) e que não adotam o refúgio (não-Bt), as razões identificadas foram: 40% relataram tratar-se de um manejo difícil, 28% não souberam responder, 14% alegaram custos elevados e 12% apontaram que a prática levaria à diminuição da produtividade. A baixa adoção de uma prática relevante para a sustentabilidade da tecnologia Bt é agravada por outros aspectos levantados na pesquisa. Entre os que declaram realizar o refúgio, 40% alegaram aplicar inseticidas da mesma forma nas áreas destinadas ao Bt e 16% não souberam responder, o que reflete o conhecimento insuficiente da prática pelos entrevistados. Entre os proprietários, o desconhecimento sobre a forma de manejo é ligeiramente menor que entre os trabalhadores: 50% alegam não aplicar os defensivos da mesma forma, o que não garante que estejam fazendo da maneira correta, mas demonstra o conhecimento da necessidade de fazer de forma distinta – apenas 6% dos proprietários não souberam responder. Entre os trabalhadores, 42% alegam fazer as aplicações de forma diferente do cultivo Bt e 21% não souberam responder. Como o aproveitamento dos benefícios das tecnologias agrícolas depende diretamente de seu entendimento e correta utilização, a educação e conscientização dos produtores de algodão, milho e soja sobre a importância das áreas de refúgio e sobre a forma correta

⁵² Aprosoja (2017). Refúgio agrícola: pragas desafiam os transgênicos. Disponível em <https://aprosojabrasil.com.br/comunicacao/blog/2017/03/23/refugio-agricola-pragas-desafiam-os-transgenicos/>. Acesso em 22/01/2022.

⁵³ CropLife e Ernst Young (2021). Inovação no Agronegócio e a qualificação do produtor brasileiro na era digital. Disponível em https://www.ey.com/pt_br/cea/agro-e-inovacao Acesso em 21/02/2022

de fazer é fator chave para aumentar a taxa de adoção e o sucesso nas ações de MRI.

4.6 Mapeamento das soluções de controle biológico

O estudo mapeou os produtos de CB registrados no MAPA e em fase pré-marketing, para controle de Lepidópteros (Noctuidae) para os cultivos de algodão, milho e soja, na Tabela 7.

Tabela 7: Relação com as principais soluções de controle biológico para controle de Lepidópteros (Noctuidae) em algodão, milho e soja.

Empresa	Produto	Cultivo	Alvo biológico	Biológico
AgBitech	Armigen	Algodão Soja	<i>Chloridea virescens</i> <i>Helicoverpa armigera</i> , <i>Helicoverpa zea</i>	Baculovirus HearNPV (Grupo 31 IRAC Internacional).
AgBitech	Cartugen	Algodão Milho Soja	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Baculovirus SfMNPV (Grupo 31 – IRAC Internacional).
AgBitech	Chrysogen	Soja	<i>Chrysodeixis includens</i> .	Baculovirus ChinNPV (Grupo 31 IRAC Internacional).
AgBitech	Surtivo	Soja (não-Bt)	<i>Helicoverpa armigera</i> <i>Chrysodeixis includens</i>	Baculovirus HearNPV e ChinNPV (Grupo 31 IRAC Internacional).
AgBitech	Chamariz	Algodão Milho Soja	<i>Chloridea virescens</i> <i>Chrysodeixis includens</i> <i>Helicoverpa armigera</i> <i>Spodoptera frugiperda</i>	Semioquímico (mistura de extratos vegetais altamente atrativa para mariposas) + inseticida de choque
ISCA	Noctovi	Algodão Milho Soja	<i>Agrotis</i> sp. <i>Spodoptera</i> sp. <i>Helicoverpa</i> sp. <i>Heliothis</i> sp. <i>Pseudoplusia</i> sp.	Semioquímico Atrai-e-mata
Koppert	Diplomata	Soja	<i>Helicoverpa armigera</i>	Vírus entomopatogênico Nucleopolyhedrovirus (HearNPV) da família Baculoviridae
Koppert	Pretiobug	Algodão Milho Soja	<i>Anticarsia gemmatalis</i> <i>Chrysodeixis includens</i> <i>Helicoverpa zea</i> <i>Spodoptera frugiperda</i>	<i>Trichogramma pretiosum</i>
Promip	Baculomip SF	Algodão Milho Soja	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Baculovirus <i>spodoptera</i> multiple nucleopolyhedrovirus (SfMNPV)
Promip	Trichomip P	Algodão Milho Soja	<i>Anticarsia gemmatalis</i> <i>Chrysodeixis includens</i> <i>Helicoverpa zea</i> <i>Spodoptera frugiperda</i>	Macrobiológico <i>Trichogramma pretiosum</i>
Provivi	Pherogen	Milho	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Feromônio de confusão sexual

Empresa	Produto	Cultivo	Alvo biológico	Biológico
Oxitec	Spodoptera do Bem	Milho	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Macrobiológico Machos transgênicos de <i>S. frugiperda</i> com gene autolimitante
Simbiose	VirControl Ci	Milho	<i>Chrysodeixis includens</i>	Baculovírus <i>Chrysodeixis includens multiple nucleopolyhedrovirus</i> , (ChinMNPV)
Simbiose	CirControl Sf	Milho	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Baculovírus <i>Spodoptera frugiperda multiple nucleopolyhedrovirus</i> (SfMNPV)
Vittia	TRICHO-VIT	Milho Soja	<i>Anticarsia gemmatilis</i> <i>Helicoverpa zea</i> <i>Chrysodeixis includens</i> <i>Spodoptera frugiperda</i>	Macrobiológico <i>Trichogramma pretiosum</i>
Provivi	Pherogen	Milho	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Feromônio de confusão sexual

Fonte: Agrofit e websites das empresas.

4.7 Aspectos econômicos, operacionais e técnicos das soluções de CB

4.7.1 Aspectos econômicos

Dados da consultoria Spark (2021) com a área plantada na safra 2020/2021 revelam que a proporção dos cultivos não-Bt com relação aos cultivos Bt está abaixo dos percentuais recomendados para o refúgio agrícola estruturado de 20% no algodão, 10% no milho e 20% na soja (Tabela 8), fato que aumenta a pressão para a ocorrência de casos de resistência de lagartas às plantas GM com proteínas Bt.

Tabela 8: Área cultivada de algodão, milho e soja com tecnologia Bt e não-Bt na safra 2020/2021.

Tecnologia	Algodão Area 1.000 ha (%)	Milho/Inverno¹ Area 1.000 ha (%)	Milho/Verão Area 1.000 ha (%)	Soja Area 1.000 ha (%)
Bt	1.101 (86%)	13.493 (92%)	3.412 (94%)	30.602 (81%)
Não-Bt	179 (14%)	1.101 (8%)	213 (6%)	7.170 (19%)

Fonte: Consultoria Spark (2021). ¹Área cultivada em 2021.

O plantio intensivo de algodão, milho e soja com tecnologia Bt em não conformidade as recomendações de MRI, causou o aumento do percentual da adoção de inseticidas, assim como o número de aplicações de inseticidas químicos para o controle de lagartas, conforme pode ser observado na Tabela 9, ao comparar os dados

da safra 2018/2019 e da safra 2020/2021. Com exceção do cultivo de algodão GM Bt (8,4 para 5,8 aplicações por safra), é possível concluir que os custos com a aplicação de inseticidas químicos aumentou nos cultivos de milho e soja entre a safra 2018/2019 e a safra 2020/2021, considerando não apenas o número de aplicações por safra, mas também o aumento na taxa de adoção e na área plantada.

Tabela 9: Média ponderada do número de aplicações de inseticidas químicos foliares para controle de lagartas e a taxa de adoção de tratamento com inseticidas em áreas cultivadas de algodão, milho e soja com Bt e não-Bt na safra 2018/2019 e 2020/2021.

Tecnologia & Safra	Algodão N° aplicações Adoção (%)	Milho/Inverno N° aplicações Adoção (%)	Milho/Verão N° aplicações Adoção (%)	Soja N° aplicações Adoção (%)
Bt (18/19)	8,4 (89%)	1,8 (66%)	0,8 (51%)	2,0 (52%)
Não-Bt (18/19)	10,7 (92%)	2,5 (93%)	2,3 (75%)	3,1 (96%)
Bt (20/21)	5,8 (90%)	1,8 (54%)	0,9 (54%)	2,0 (65%)
Não-Bt (20/21)	11,9 (100%)	2,7 (98%)	2,3 (85%)	3,3 (97%)

Fonte: Consultoria Spark (2021).

Dados da consultoria Spark BIP soja (2021) revelam que a taxa de adoção de produtos biológicos na soja cresceu de 14% na safra 2018/2019 para 21% na safra 2020/2021. Os principais mercados para biológicos na safra 2020/2021 de soja foram: nematicidas (47%), biofungicidas (12%), bioinseticidas para controle de lagartas (5%) e bioinseticidas para sugadores (3%). Ainda de acordo com a Spark BIP soja (2021), o crescimento de 13% da área plantada com soja Bt entre as safras 2016/2017 e 2020/2021, contribuiu para redução de 17% nas aplicações de bioinseticidas a base de *B. thuringiensis* no mesmo período. Este dado corrobora para a hipótese de que os agricultores preferem adotar amplamente as soluções com as plantas GM com proteínas Bt, porque acreditam que são mais eficientes, simplificam a operação e minimizam seus custos, em detrimento da adoção das áreas de refúgio (não-Bt), que além de exigir uma operação diferenciada, aumenta a complexidade e poderia reduzir as margens de lucro. De acordo com Koren (2022), o agricultor tem observado relações de troca entre receitas e custos cada vez mais deterioradas ao longo do tempo, visando a produtividade máxima econômica, onde as margens de lucro determinam o nível tecnológico, sendo de extrema importância sua avaliação para a saúde da lavoura.

De acordo com Parra (2022), os desafios do CB começam a ser superados, seja o problema cultural (preferência pela facilidade operacional dos inseticidas químicos), ou aqueles relacionados à percepção equivocada sobre custo, no qual o CB deve ser mais barato do que o controle com químicos, sem considerar os benefícios socioambientais para o agroecossistema. Em alguns casos, o desenvolvimento de uma solução com macrorganismos pode levar até 15 anos de pesquisa antes de chegar às lavouras. Outro desafio a ser superado é acreditar que o CB deveria combater os insetos-praga isoladamente e que demora a ter controle, quando na verdade o conceito é de MIP, com maior compreensão das relações tritróficas para promover equilíbrio e proteger a saúde das plantas de forma sustentável. Outro desafio é crença de que as grandes criações de insetos são inviáveis, quando na verdade houve uma evolução nas técnicas para as criações massais de inimigos naturais, que já estão permitindo a liberação de grande número de parasitoides e uma resposta rápida de controle, diferentemente do que se pensava quando foi iniciado o CB clássico (PARRA, 2022)⁵⁴.

4.7.2 Aspectos operacionais

Em fazendas com alta tecnologia e que realizam o monitoramento digital em grandes extensões de algodão, milho e soja GM com tecnologia Bt, os responsáveis pelo planejamento agrícola são conscientes sobre a importância da adoção do refúgio (não Bt). Quando perguntados sobre quais são os maiores desafios para implementar o conjunto de BPA do MRI, relacionam: (1) Dificuldade operacional para realizar o plantio do refúgio agrícola (não-Bt) em faixas, com variedades que tenham o mesmo ciclo fenológico e potencial produtivo das plantas Bt; (2) Problemas de deriva e risco de fitotoxicidade devido ao uso de diferentes biotecnologias em plantas GM Bt e não-Bt tolerantes a herbicidas; (3) Preferência pelo uso de inseticidas químicos, devido a maior disponibilidade e praticidade na operação em áreas Bt e não Bt; (4) Disponibilidade de produtos biológicos e a logística de transporte e armazenamento para atender grandes escalas. Consultores e os responsáveis pelo planejamento

⁵⁴ PARRA (2022). Cana-de-açúcar: cultura de tradição em controle biológico no Brasil. Globo Rural. A palavra do campo. Disponível em <https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Opinio/Vozes-do-Agro/noticia/2022/02/cana-de-acucar-cultura-de-tradicao-em-controle-biologico-no-brasil.html> Acesso em 11/02/2022.

agrícola em fazendas altamente tecnificadas, relatam que a cada safra percebem a perda na eficiência das plantas GM com tecnologia Bt, sendo necessária a intervenção com a aplicação de inseticidas químicos ou bioinseticidas para evitar danos econômicos, confirmando os dados revelados na pesquisa Spark BIP soja (2021).

No caso do CB em soja, os microrganismos entomopatogênicos, como os baculovirus para controle de lagartas e os fungos *Metarhizium anisopliae* e *Beauveria bassiana* para controle de percevejos, são mais facilmente utilizados do que os macrorganismos que agem como parasitoides, como o *Trichogramma pretiosum* para controle de lagartas e *Trissolcus basalidis* e *Telenomus podisi* para controle de percevejos, pelo fato dos produtos à base de microrganismos se assemelharem aos defensivos químicos na sua embalagem e na forma de aplicação, além de terem a o tempo de prateleira (vida-útil) maior, pois o microbiológico pode ser utilizado por vários meses após a compra, enquanto o macrobiológico precisa que a liberação seja realizada em curto prazo para evitar que os parasitoides morram (PARRA, 2022).

As principais vantagens e desvantagens do uso de bioinseticidas a base de baculovirus na soja, listadas na Tabela 10, contribuem para o mapeamento dos desafios e oportunidades do uso de microbiológicos no controle de lagartas resistentes.

Tabela 10: Principais vantagens e desvantagens do uso de bioinseticidas a base de baculovirus na soja.

Vantagens	Desvantagens
Especificidade e seletividade aos inimigos naturais	Infecta apenas uma espécie de inseto-praga de cada vez
Podem ser aplicados com os mesmos equipamentos usados para aplicação de inseticidas químicos e não necessita de equipamentos especiais	Deve respeitar o volume de calda
Baixo custo de aplicação, pois a maioria dos produtos químicos possui compatibilidade com os baculovirus.	Ação mais lenta que a dos inseticidas químicos, demorando mais tempo para matar o inseto-alvo (até 4 dias após a aplicação para o inseto-praga parar de se alimentar).

Vantagens	Desvantagens
Controla lagartas homozigotas resistentes (RR) às plantas GM com proteínas Bt	Exige o monitoramento da lavoura para identificar o NA e ação rápida para controle de lagartas.

Fonte: Adaptado de FONTES e VALADARES et al. (2020).

Sobre aspectos práticos e operacionais no uso de macrobiológicos, é possível encontrar facilmente artigos em veículos especializados sobre a eficiência dos drones na liberação de agentes de controle biológicos e na redução de custos. Nessas publicações, há relatos de agricultores que normalmente utilizam o controle químico tradicional com pulverização tratorizada de inseticidas químicos, satisfeitos com a experiência de substituir pela liberação de macrobiológicos na lavoura. Matéria publicada na *Campo & Negócios* (2020)⁵⁵, relata um caso de sucesso em que uma única liberação de *T. pretiosum* para o controle de lagartas no cultivo de milho substituiu 5 aplicações de inseticidas químicos com o controle convencional. Neste caso, foi necessária apenas uma dispersão de vespas para controlar as lagartas em todo o ciclo do cultivo do milho. A utilização de drones permite a liberação de agentes biológicos em grandes áreas de algodão, milho e soja, com rendimento de 200 a 350 hectares por dia, além de não utilizar a infraestrutura de equipamentos do produtor. Empresas prestadoras de serviços divulgam que toda a operação com drone custa menos que uma única aplicação convencional, usando tratores, motos ou liberação manual.

Os desafios operacionais para implantar as áreas de refúgio (não-Bt) e maneja-las realizando o monitoramento, MIP e soluções de CB, guardam certa semelhança com os desafios enfrentados pelos pioneiros que implementaram o sistema de plantio direto na palha em escala de lavoura motomecanizada no início dos anos de 1990 no município de Rolândia-PR, pois apesar da tecnologia ser inovadora e sustentável, sua operacionalização gerava desafios que pareciam insuperáveis. Na ocasião, a ICI do Brasil ocupou lugar de destaque no processo de viabilização do Plantio Direto (PD). A partir de 1972, além da implementação de intenso processo de difusão dessa técnica junto a produtores rurais, incentivou e apoiou inúmeras entidades a efetuarem investigações técnico-científicas orientadas à

⁵⁵ *Campo & Negócios* (05/05/2020). Liberação de macrobiológicos via drone gera maior rentabilidade. Disponível em <https://revistacampoenegocios.com.br/liberacao-de-macrobioologicos-via-drone-gera-maior-rentabilidade/> Acesso em 16/02/2022.

avaliação de sistemas de manejo e fertilização de solo sobre a produtividade das culturas, ao desenvolvimento de equipamentos para semeadura e aplicação de herbicidas e, fundamentalmente, ao manejo de plantas daninhas (BORGES, 1993). O processo de introdução do PD no Brasil ocorreu de forma simultânea em nível de pesquisa e em escala comercial nas lavouras (CERETTA et al., 2007). De acordo com a Federação Brasileira do Sistema de Plantio Direto (FEBRAPDP, 2022)⁵⁶, o PD tem atualmente mais de 33 milhões de hectares da área cultivada no país.

4.7.2.1 Monitoramento

O monitoramento nas extensas lavouras de algodão, milho e soja, para acompanhar semanalmente a densidade populacional de insetos-praga e o percentual de desfolha, ainda é percebido pela maior parte dos agricultores como um desafio operacional, pois exige mão-de-obra especializada (inspetores treinados) e o investimento em soluções de AP, o que gera aumento nos custos de produção (EMBRAPA, SEBRAE e INPE, 2020)⁵⁷. A aplicação de inseticidas químicos de forma convencional na soja no Paraná ainda é a prática mais utilizada pelos agricultores, pois tem garantido níveis de controle satisfatórios. Mesmo gerando aplicações desnecessárias, a calendarização das aplicações ainda permite que os agricultores reduzam as perdas causadas pelos insetos-praga e obtenham rentabilidade no final da safra (CONTE et al., 2020). No entrando, a aplicação calendarizada de inseticidas químicos não é sustentável, pois promove desequilíbrios ecológicos, afetando insetos benéficos (polinizadores) e inimigos naturais (predadores e parasitoides). Com o aumento da oferta de soluções digitais nas armadilhas e ferramentas de monitoramento, assim como a materialização acerca dos benefícios ecológicos e a economia gerada pela otimização do uso combinado de inseticidas químicos e biológicos com o MIP, criam-se oportunidades para a expansão das áreas com monitoramento digital e de MRI nas lavouras GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt nos próximos anos.

⁵⁶ Federação Brasileira do Sistema de Plantio Direto (FEBRAPDP, 2022). Disponível em <https://febrapdp.org.br/> Acesso em 19/02/2022.

⁵⁷ Embrapa, Sebrae, Inpe. (2020). Pesquisa mostra o retrato da agricultura digital brasileira. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/54770717/pesquisa-mostra-o-retrato-da-agricultura-digital-brasileira>. Acesso em 20/02/2022.

4.7.3 Aspectos técnicos

4.7.3.1 Eficácia agronômica dos cultivos GM com tecnologia Bt

Cultivares de algodão, milho e soja GM com tecnologia Bt tornaram-se as ferramentas de manejo mais utilizadas para o controle de lagartas e contribuíram para a redução do número de aplicações de inseticidas, desde que foram aprovadas para uso comercial pela CTNBio em 2005, 2007 e 2010, respectivamente. Apesar da alta eficiência contra importantes insetos-praga, as principais proteínas Bt não controlam com 100% de eficácia todas as espécies de lepidópteros da família Noctuidae. Mesmo com o sucesso das culturas GM com tecnologia Bt, a literatura registra que inúmeras espécies de pragas estão desenvolvendo níveis crescentes de resistência às toxinas Cry. Para evitar ou retardar o processo de estabelecimento de populações resistentes às culturas de algodão, milho e soja GM com proteínas Bt e maximizar a sustentabilidade da tecnologia é necessário implementar um conjunto integrado de estratégias de MRI (GOULD; TABASHNIK, 1998).

Até o momento, a eficácia dos cultivos GM com tecnologia Bt apresentaram performance consistente, mas este sucesso está ameaçado pela redução das áreas de refúgio (não-Bt), considerada em orientação técnica do GBIO/IRAC-BR (2016), a principal estratégia para retardar a evolução da resistência de insetos às culturas Bt. Estudo realizado por Horikoshi et al. (2021) desenvolveu a avaliação em larga escala da eficácia no campo de soja GM com proteína Cry1Ac e demonstrou que os benefícios do controle de lagartas foram mantidos entre às safras 2012/2013 a safra 2019/2020 nas mesorregiões produtoras no Brasil. A soja GM com proteína Cry1Ac forneceu aos agricultores brasileiros oito anos de proteção consistente contra danos causados pelas pragas lepidópteras primárias da soja (*C. includens* e *A. gemmatilis*). O estudo também concluiu que a soja GM com proteína Cry1Ac precisa ser vista como uma ferramenta dentro da caixa de ferramentas de MIP e deve ser combinada com outras táticas de controle (HORIKOSHI et al., 2021).

4.7.3.2 Produtos biológicos para controle de lagartas

Sobre as opções de bioinseticidas para CB de lagartas em lavouras GM de algodão, milho e soja Bt, existem microbiológicos, macrobiológicos e semioquímicos

disponíveis no mercado para os programas de MIP e MRI: (1) Baculovirus, com vasta literatura sobre a eficiência desses vírus entropatogênicos para controle de *S. frugiperda* e outras lagartas; (2) *Trichogramma*, vespas que atuam como parasitoides e já são utilizadas em extensas áreas de soja para controle de *H. armigera* e *C. includens*, além de ter ampla literatura sobre a eficiência no controle de lagartas; (3) Semioquímicos, com a mistura de substâncias voláteis de plantas que atraem insetos-praga adultos de ambos os sexos, combinado com inseticidas de choque, denominado sistema “atrai-e-mata”, para controle de mariposas *S. frugiperda*, *S. eridania*, *S. cosmioides*, *A. gemmatalis*, *E. lignosellus*, *H. armigera*, *H. zea* e *C. virescens*, dentre outras, nas lavouras de algodão; (4) Semioquímico, com o uso de feromônio de confusão sexual para controle da lagarta-do-cartucho (*S. frugiperda*) nas lavouras de milho.

4.7.3.3 Conceito de bio-refúgio agrícola

O “bio-refúgio” agrícola é, por hipótese, uma proposta de manejo mais sustentável, desenvolvida com base nas informações colhidas na literatura pesquisada, visando ampliar os benefícios econômicos e socioambientais com relação ao refúgio agrícola convencional. O conceito de “bio-refúgio” preconiza o uso do CB e do monitoramento de pragas, com o objetivo de conservar e promover a propagação de insetos benéficos (agentes polinizadores e inimigos naturais), assim como de lagartas suscetíveis (SS) nas áreas semeadas com plantas não-Bt.

Nas áreas de “bio-refúgio”, o controle dos insetos-praga deve ser realizado sempre com base no MIP, utilizando-se as estratégias de CB aplicado ou aumentativo, com a liberação de macrobiológicos, ou com a aplicação de bioinseticidas microbiológicos ou semioquímicos, quando a densidade populacional de pragas ou o nível de desfolha nestas áreas atingirem o NA. Na impossibilidade de usar algum bioinseticida, o agricultor poderia substituí-lo por um inseticida químico seletivo, sempre visando a conservação dos inimigos naturais. Ao estimular o aumento das populações de insetos benéficos, o “bio-refúgio” funcionaria como um “berçário de inimigos naturais”, corroborando para um maior equilíbrio ecológico nas lavouras não-Bt e Bt. Ao implementar o MIP com CB no “bio-refúgio”, é esperado que o agricultor reduza os custos com controle de insetos-praga, minimizando o número de operações

para a aplicação de inseticidas químicos, tanto nas áreas não-Bt, como nas áreas com plantas GM com tecnologia Bt, quando esta for comparada com a aplicação convencional ou calendarizada somente de inseticidas químicos. Enquanto o refúgio agrícola visa benefícios de médio e longo prazo para evitar ou retardar a ocorrência de resistência, o “bio-refúgio” agrícola poderia proporcionar benefícios econômicos na mesma safra para o agricultor.

O “bio-refúgio” pode ser viável para minimizar desequilíbrios causados pelo uso de inseticidas químicos e promover o controle de pragas por meio de inimigos naturais. Um caso relatado de desequilíbrio no Brasil, ocorreu com *C. includens*, uma lagarta que até a safra 2003/2004 era considerada uma praga secundária na soja, quando o uso excessivo de inseticidas químicos, inclusive associados com fungicidas, eliminaram parasitoides, predadores e fungos entomopatogênicos naturais que a controlavam, gerando desequilíbrios que a tornaram uma praga de grande importância econômica (MOSCARDI, 2008; SOSA-GÓMEZ et al., 2010;). Com amplo registro na literatura, o CB atua de forma específica no controle dos insetos-praga por meio de inimigos naturais, minimizando o risco de desequilíbrio ecológico no agroecossistema. A hipótese sobre o conceito de “bio-refúgio” necessita de estudos e pesquisas mais aprofundadas, para que possa ser confirmada ou refutada, dada a diversidade de variedades e biotecnologias, biodiversidade, paisagens agrícolas e condições edafoclimáticas nas regiões produtoras de algodão, milho e soja no Brasil.

4.8 Boas práticas agrícolas

As Boas Práticas Agrícolas (BPA) são um conjunto de técnicas de manejo que ajudam o agricultor a ter mais eficiência e a fazer o uso sustentável das tecnologias no campo. As recomendações de BPA reúnem um conjunto de táticas integradas⁵⁸ para o MRI nas lavouras de algodão, milho e soja com tecnologias Bt, a saber: (1) Dessecação pré-plantio, que evita que restos das culturas antecessoras, plantas daninhas estejam presentes na semeadura; (2) Uso de sementes certificadas, de modo a garantir a integridade genética; (3) Tratamento de sementes, com o objetivo de controlar as pragas e doenças iniciais; (4) Calendarização da semeadura, para

⁵⁸ Boas Práticas. Disponível em <https://boaspraticasagronomicas.com.br/boas-praticas/boas-praticas-agronomicas/> Acesso em: 10/09/2021.

evitar a migração de pragas das lavouras mais velhas para as mais novas; (5) Plantio das áreas de refúgio agrícola, para evitar ou retardar o desenvolvimento de populações de insetos-praga resistentes às proteínas inseticidas das culturas Bt; (6) Controle de plantas daninhas (incluindo plantas voluntárias) para evitar a presença de plantas hospedeiras de pragas; (7) Monitoramento de pragas, cujo o objetivo principal é identificar o NA, para adotar medida de controle; (8) Priorização de inseticidas químicos seletivos e a rotação de mecanismos de ação, para evitar a ocorrência de resistências.

Entre os desafios para disseminar as BPA, a realização de treinamentos para capacitar inspetores e implementar o monitoramento das grandes extensões de áreas com algodão, milho e soja se destaca. Com o monitoramento da densidade populacional de insetos-praga, assim como o nível de desfolha para identificar o NA, a tomada de decisão para o controle com inseticidas químicos ou bioinseticidas se torna mais assertiva, evitando aplicações desnecessárias. De acordo com o SENAR, em 2021 foram realizados 136 cursos de MIP para os cultivos de algodão, milho e soja, atingindo 1.542 participantes, sendo 78,2% no Paraná, 16,9% em Goiás e 4,9% no Mato Grosso. Os números destacam o maior engajamento dos agricultores paranaenses, provavelmente em função das ações de difusão de tecnologia do Programa MIP-Soja, realizado por meio de parceria entre o IDR-Paraná, Embrapa Soja e SENAR-PR desde 2016. De acordo com a publicação Potencialidades e desafios do agro 4.0 (MAPA, 2021), a implementação de soluções digitais na agricultura ainda encontra desafios relacionados à tomada de decisão, pois os agricultores precisam tomar decisões assertivas com base nas informações colhidas. No entanto, há casos em que há muita informação colhida e pouca análise desses dados. Há problemas para a coleta e controle das informações que dependem do fator humano, gerando inconsistências na base de dados. Quanto mais automatizada a coleta de informações, melhor a qualidade dos dados. Este desafio reflete a baixa capacitação da mão-de-obra, especialmente no quesito “processos”, uma vez que a maioria das fazendas obedece a um fluxo de trabalho próprio, muitas vezes definido pelo proprietário, o que dificulta a parametrização para um processo contínuo.

4.9 Nova abordagem nas ações educativas (BPA)

A educação do agricultor e a transferência de tecnologia para os profissionais que atuam na agricultura são elementos críticos na estratégia para manejar de forma sustentável a ocorrência de resistência de insetos às plantas GM com tecnologia Bt.

As principais práticas para conter o avanço da resistência de lagartas às plantas GM com tecnologia Bt, incluem o uso de diferentes práticas agrônômicas, como o desenvolvimento de novas variedades de plantas resistentes, inclusive por meio de biotecnologia, inseticidas mais eficazes, CB, MIP, armadilhas com feromônio, estratégias de conservação ou aumento de inimigos naturais para CB. Soluções digitais, como aplicativos móveis para coletar e compartilhar dados em tempo real sobre a densidade populacional de pragas, percentual de desfolha ou outros danos, o uso de internet das coisas com sensores que podem ser usados para automatizar a identificação e captura de insetos-praga por armadilhas no campo, são soluções promissoras para auxiliar no manejo sustentável de lagartas. A difusão de tecnologia e a educação profissionalizante para implementar soluções de MIP e CB são essenciais para conscientizar o agricultor e promover a mudança de comportamento, tornando mais efetivas as ações de MRI.

Numa análise sobre os conteúdos dos treinamentos realizados atualmente pelo SENAR-PR sobre MIP para os cultivos de milho e soja, é possível identificar a variação na carga horária entre 36 e 52 horas para a formação dos inspetores de campo, número de vagas de 12 a 16 alunos por turma, com conteúdo programático que abrange: (a) Conceitos básicos e importância do MIP; (b) Protocolo de condução do talhão no MIP; (c) Principais pragas da cultura; (d) Principais inimigos naturais das pragas; (e) Estádios fenológicos da cultura; (f) Amostragens dos insetos; (g) NA e NDE; (h) Alternativas de manejo para controle (SENAR-PR, 2022).

Ao analisar a evolução da demanda pelo curso MIP-Soja no SENAR-PR (Tabela 4), é possível constatar o crescente interesse dos agricultores sobre o tema, tendo em vista os benefícios econômicos e socioambientais com a redução do número de aplicações de inseticidas químicos. O produtor rural Laércio Dalla Vecchia, de

Mangueirinha-PR, realizou o curso MIP-Soja com o SENAR-PR⁵⁹ em 2018. Em 2020, ele venceu o Desafio Nacional de Máxima Produtividade, realizado pelo Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB), com a produtividade de 118 sacas de soja por hectare. Defensor do monitoramento e do MIP-Soja, Dalla Vecchia declarou, em webinar⁶⁰ realizado pela Federação da Agricultura do Estado do Paraná (FAEP) em 2020, que os inimigos naturais (predadores e parasitóides) deveriam ser denominados “amigos naturais”, pois ajudam a proteger a lavoura dos insetos-praga. Na verdade, a denominação “inimigos naturais” é em relação aos insetos-praga. O caso de sucesso do Programa MIP-Soja no Paraná tem potencial para ser replicado e ter o seu conteúdo programático enriquecido continuamente por meio de EaD, com a incorporação de conhecimentos sobre as novas tecnologias de CB, as modernas tecnologias digitais de monitoramento, estratégias de manejo de resistências, a diferença de tratamento fitossanitário entre as áreas Bt e não-Bt, além da criação de novos cursos para capacitar analistas de dados e os tomadores de decisão.

Entrevistas com consultores e com agricultores revelam que manejo fitossanitário para controle de insetos-praga nas áreas de algodão, milho ou soja GM com tecnologia Bt é praticamente o mesmo das áreas de refúgio (não-Bt), quando estas são implementadas e estão em conformidade, com o agravante de que o número de aplicações de inseticidas nas áreas não-Bt é frequentemente maior, como revelam os dados da consultoria Spark BIP soja (2021) e o Programa MIP-Soja no Paraná (CONTE, et al., 2020).

4.10 Desafios e oportunidades no uso de CB na estratégia de MRI

O presente trabalho se propõe a mapear os desafios e as oportunidades do uso do CB na estratégia de MRI em cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt, analisando as soluções disponíveis no mercado brasileiro, assim como algumas novas tecnologias que estão em fase de desenvolvimento e podem prosperar nos próximos anos.

⁵⁹ Sistema Faep/Senar-PR (2020). Agricultor paranaense ganha prêmio de soja sem aplicar inseticida. Disponível em <https://atual.sistemafaep.org.br/agricultor-paranaense-ganha-premio-de-produtividade-de-soja-sem-aplicar-inseticidas/> Acesso em 20/02/2022.

⁶⁰ Faep/Senar-PR. Webinar: MIP gerando cameões da soja. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=xquDvCurKvo&t=2307s> Acesso em 20/02/2022.

Apesar dos desafios para o crescimento da taxa de adoção das áreas de refúgio (não-Bt), do CB e do monitoramento em grandes extensões de áreas de algodão, milho e soja (Tabela 11), a hipótese é sustentada pela fundamentação teórica e os fatos que materializam o CB como solução capaz de fortalecer as estratégias de MRI em lavouras GM com tecnologia Bt.

Tabela 11: Área plantada com tecnologia Bt na safra 2020/2021 e a área de refúgio agrícola necessária para o MRI.

Cultivo & Safra	Área Bt 1.000 ha	Refúgio necessário (não-Bt) 1.000 ha
Algodão (2020/2021)	1.101	220,2 (20%)
Milho verão (2020/2021)	3.552	355,2 (10%)
Milho inverno (2021)	14.367	1.436,7 (10%)
Soja (2020/2021)	36.219	7.243,8 (20%)

Fonte: Adaptado de Spark (2021)

Considerando a possibilidade de utilizar CB na totalidade da área necessária para atingir 100% de conformidade das áreas de refúgio agrícola (não-Bt), a área tratada com produtos biológicos somaria mais de 9,2 milhões de hectares no Brasil, sendo 7,2 milhões de hectares na soja, 1,8 milhão hectares no milho e 220 mil hectares no algodão (Tabela 11). Como referência, toda a área tratada com produtos para CB na safra 2020/2021 somou 12,239 milhões de hectares (Spark BIP safra 2020/2021). De acordo com a Blink (2021), o mercado de soja foi distribuído com as seguintes participações: bionematicidas 32,7%, bioinseticidas 32,4%, tratamento de sementes 20,6% e biofungicidas 14,2%. Para aumentar o uso de CB e do MIP no MRI nos cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt no Brasil, desafios precisam ser superados e oportunidades capturadas pelos atores das cadeias produtivas (Tabela 12).

Tabela 12: Principais desafios e oportunidades para ampliar o uso de CB na estratégia de MRI em lavouras de algodão, milho e soja GM com tecnologia Bt.

Desafios	Oportunidades
1. Mudar o hábito dos agricultores (cultura) com relação ao tratamento convencional (aplicação calendarizada) de inseticidas químicos, misturas em tanque, visando simplificar a operação com máquinas.	1. Difundir tecnologia e resultados práticos do MIP, demonstrando a redução de custos, o menor número de aplicações de inseticidas e indicadores de sustentabilidade superiores, a exemplo do programa MIP-Soja PR.
2. Aumentar a oferta dos produtos para CB no campo e melhorar aspectos da logística, como a armazenagem, transporte, vida-útil (carga-viva), refrigeração etc.	2. Construir biofábricas distribuídas nas principais regiões agrícolas, visando atender a demanda local.
3. Monitorar grandes extensões de lavouras e superar a dificuldade para identificar o NA para CB (liberação ou aplicação de bioinseticidas).	3. Automatizar, usar ferramentas digitais para monitoramento, contratar profissionais especializados e serviços de agricultura de precisão.
4. Justificar o maior custo com a contratação de mão-de-obra capacitada para fazer as inspeções periódicas e analisar dados de monitoramento da densidade populacional de insetos e de danos nas plantas.	4. Demonstrar que investir na contratação ou na capacitação de inspetores de campo e analistas de dados proporciona assertividade na tomada de decisão e gera economia de recursos.
5. Aumentar a taxa de adoção das áreas de refúgio agrícola pelos agricultores, para evitar ou retardar a ocorrência de resistência de lagartas aos cultivos GM com proteínas Bt.	5. Implementar o conceito de “bio-refúgio”, com uso de CB para aumentar a quantidade de inimigos naturais, estimulando o uso desses agentes para o controle de insetos resistentes.
6. Realizar a liberação de microbiológicos e aplicação de microbiológicos em grandes extensões de áreas.	6. Ampliar a oferta de serviços para a liberação ou aplicação de produtos biológicos com drones ou aviação agrícola.

Fonte: Autor.

Com base nos desafios e oportunidades identificados no estudo, os seguintes objetivos foram listados para viabilizar o aumento da participação do CB na estratégia de MRI (Tabela 13).

Tabela 13: Oportunidades e benefícios esperados do uso do CB em lavouras GM com tecnologia Bt e em área de refúgio agrícola (plantas não-Bt).

Oportunidades	Benefícios esperados
Fortalecer as estratégias de MRI para as lavouras GM com proteínas Bt	<ul style="list-style-type: none"> • Melhorar a eficiência no controle de insetos-praga resistentes (RR) às proteínas Bt. • Aumentar a eficiência das áreas de refúgio agrícola e assegurar a produção de indivíduos homozigotos suscetíveis (SS) às proteínas Bt. • Ampliar a caixa de ferramentas para manejo fitossanitário de insetos-praga. • Evitar ou retardar a ocorrência de resistência de pragas a inseticidas químicos. • Reduzir custos e melhorar a rentabilidade da lavoura.
Promover a sustentabilidade no sistema produtivo algodão, milho e soja.	<ul style="list-style-type: none"> • Otimizar o uso de inseticidas químicos e evitar aplicações desnecessárias (calendarizadas). • Aumentar a presença de insetos benéficos nas lavouras (inimigos naturais e polinizadores). • Aumentar a longevidade da tecnologia Bt e conservar seus benefícios econômicos e socioambientais. • “Bio-refúgio”: usar, sempre que possível, o CB nas áreas de refúgio (não-Bt), e transformá-las em local para conservar ou desenvolver inimigos naturais, assim como os serviços de polinização como bioinsumo.

Fonte: Autor.

4.11 Propostas com possíveis soluções

Com base na pesquisa bibliográfica, análises qualitativas, conceituais, comparativas, entrevistas e depoimentos colhidos, a presente pesquisa elaborou propostas com possíveis soluções para o enfrentamento aos atuais problemas causados pelo decréscimo nas taxas de adoção das áreas de refúgio (não-Bt), dentre outras falhas na implementação das estratégias de MRI nos cultivos GM de algodão, milho e soja com proteínas Bt.

Tabela 14: Propostas com possíveis soluções para estimular a adoção do refúgio agrícola (não-Bt) em cultivos GM de algodão, milho e soja com proteínas Bt, assim como promover o MIP, o CB e o uso de ferramentas digitais de AP.

N°	Propostas com possíveis soluções
1	Material educativo: desenvolver novos conteúdos educativos para reforçar as recomendações de CB e MIP nas estratégias de MRI para os cultivos GM com tecnologia Bt.
2	Transferência de tecnologia: realizar parcerias para intensificar as ações de difusão de conhecimento por meio de assistência técnica coletiva, dias de campo, giro técnico sobre o refúgio agrícola, CB, MIP e MRI.
3	Rentabilidade: realizar pesquisas em campo para materializar o retorno econômico superior para produtores que adotam as áreas de refúgio (não-Bt) e utilizam corretamente as ferramentas de monitoramento, MIP e CB.
4	Empreendedorismo: criar rede de cooperação para acelerar pesquisas aplicadas e escalar ações comerciais de CB, inovações, serviços de MIP e agricultura digital para os cultivos de algodão, milho e soja.
5	Bio-refúgio agrícola: realizar pesquisas para validar o conceito no campo e implementar nova abordagem de comunicação para a sustentabilidade: fomento aos bioinsumos e serviços ecossistêmicos (insetos benéficos: inimigos naturais e polinizadores).
6	Política pública: desenvolver modelo de governança para engajar a cadeia produtiva e preservar os benefícios públicos dos cultivos GM com tecnologia Bt, criando ações de estímulo ao MRI, MIP e CB.

Fonte: Autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura consultada e os fatos identificados nos sistemas produtivos de algodão, milho e soja, somados aos avanços tecnológicos, ao potencial de inovação e crescimento do mercado de bioinseticidas, MIP e agricultura digital, reúnem elementos tangíveis para confirmar a hipótese científica de que os produtos para CB são viáveis para o MRI nos cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt no Brasil.

Conjuntura atual

O estudo reuniu dados que materializam a jornada de crescimento das áreas plantadas, da produção e da produtividade dos cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt no Brasil. A expansão da tecnologia Bt nesses cultivos gerou ganhos econômicos e socioambientais desde quando foi lançada comercialmente a partir de 2005.

Em contrapartida, a redução na taxa de adoção das áreas de refúgio agrícola em conformidade contribui para o aumento da pressão de seleção e do risco de ocorrência de resistências de lagartas às plantas GM de algodão, milho e soja com proteínas Bt. No caso da soja, a taxa de adoção de refúgio (não-Bt) reduziu de 82,1% na safra 2014/2015 para 21,4% na safra 2019/2020 (HORIKOSHI et al., 2021). A agricultura praticada no Brasil, com sucessão de cultivos e condições edafoclimáticas favoráveis, contribui para proliferação de pragas, doenças e plantas daninhas. De acordo com relatório revisado do IPCC (2021), as mudanças climáticas poderão resultar em problemas crescentes relacionados com fitossanidade em ecossistemas manejados.

O mercado de CB no Brasil está em ascensão e tem crescido a uma taxa anual superior a 30%, que é cerca de duas vezes a taxa média global. As projeções indicam que as taxas de crescimento no país devem se manter elevadas até 2030. O número de registros de produtos biológicos atingiu 480 em dezembro de 2021 e novas soluções para o controle de pragas no algodão, milho e soja estão sendo comercializadas, contribuindo para as estratégias de MRI e programas de MIP. Afinal, os bioinseticidas agem de forma seletiva no controle dos insetos-praga, contribuindo para a conservação ou aumento da densidade populacional de inimigos naturais.

O ecossistema de inovação no agro brasileiro é um dos mais dinâmicos do mundo e está em expansão, com o surgimento de novos bioinseticidas e soluções de agricultura digital. A automação ajuda a otimizar o manejo fitossanitário em extensas áreas de algodão, milho e soja GM com tecnologia Bt, aumentando a competitividade.

Desafios

Superar as objeções dos agricultores e reverter a tendência de queda na taxa de adoção das áreas de refúgio agrícola (não-Bt) é o maior desafio de MRI, pois em um cenário de aumento da população de insetos resistentes não controlados pelas plantas GM com proteínas Bt, os benefícios econômicos e socioambientais conquistados com a produção dos cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt podem ser perdidos, gerando retrocessos que vão impactar negativamente os agricultores e a sociedade. (AGROCONSULT, 2019; ISAAA, 2019; BROOKES; BARFOOT, 2020).

Ainda sobre o MRI, outro desafio importante é cultivar e manejar o refúgio agrícola (não-Bt) em conformidade, pois é necessário assegurar a produção de lagartas suscetíveis (SS) para o MRI nas áreas com plantas GM com proteínas Bt. Para muitos agricultores, a percepção é que as áreas de refúgio (não-Bt) são menos produtivas e rentáveis, além de tornar o manejo mais complexo.

Operacionalmente, aumentar a disponibilidade de bioinseticidas e resolver problemas na logística de transporte e armazenamento (carga viva, vida útil, fornecimento *just-in-time*), em um país com grandes dimensões territoriais, é um desafio imenso, assim como garantir a oferta de variedades de sementes (não-Bt) com alto potencial produtivo e com o mesmo ciclo das variedades Bt para os agricultores.

Com relação à implementação do MIP com o monitoramento periódico da densidade populacional de insetos, nível de desfolha e outros danos nas plantas para definir o NA, o desafio é viabilizar economicamente e operacionalmente a execução desses serviços com qualidade em grandes extensões de áreas de algodão, milho e soja. Além disso, os agricultores normalmente realizam aplicações de inseticidas de forma calendarizada para facilitar suas operações e, culturalmente, fazem o controle antes da densidade populacional de pragas atingir o NA, para evitar ao máximo a desfolha ou outros danos nas plantas.

Oportunidades

Com base na literatura, o estudo reúne evidências que sustentam a hipótese de que o CB e as soluções de AP podem, juntos, reforçar a estratégia de MRI e convencer os agricultores a implementarem as áreas de refúgio em conformidade, tendo como benefício direto a redução de custos com a aplicação de inseticidas e, conseqüentemente, menor risco de resistências, maior equilíbrio ecológico e melhor rentabilidade nos cultivos GM com tecnologia Bt. Nesse contexto, o caso de sucesso do programa MIP-Soja no Paraná deveria incorporar o CB em suas Unidades de Referência e ser replicado como modelo de capacitação de inspetores de campo e transferência de tecnologia, pois utilizando apenas o MIP e o monitoramento tradicional com pano de batida, reduziu a aplicação de inseticidas pela metade e proporcionou maior produtividade e rentabilidade ao longo de 8 safras consecutivas.

A pesquisa sustenta a hipótese de que o uso do CB na estratégia de MRI nos cultivos GM de algodão, milho e soja com tecnologia Bt poderia contribuir para o crescimento do mercado de biológicos, pois já existem bioinseticidas registrados para o controle dos principais lepidópteros que ocorrem nas lavouras de algodão, milho e soja (Tabela 7), além de outras pragas de importância econômica, como os percevejos na soja. Num cenário hipotético, o estudo considerou a possibilidade do CB ser utilizado em 100% das áreas de refúgio agrícola (não-Bt) nos cultivos de algodão (20%), milho (10%) e soja (20%). Nesse caso, se todas as áreas de refúgio estivessem em conformidade, o mercado de CB teria potencial para tratar 9,2 milhões de hectares (Tabela 11). Para as empresas que atuam com CB e AP, o MRI nas lavouras GM de algodão, milho e soja com proteínas Bt, deveria ser percebido como oportunidade para aumentar a participação de mercado e escalar suas soluções.

Além dos produtos biológicos que estão em comercialização, a pesquisa identificou novos produtos e tecnologias que poderiam reforçar as estratégias de MRI, como o uso de insetos machos transgênicos de *S. frugiperda* com gene autolimitante (REAVEY et al., 2022).

Para desenvolver uma nova abordagem de comunicação, o presente trabalho propõe unir as soluções de CB e monitoramento com ferramentas de AP para construir o conceito de “bio-refúgio” agrícola, que é, por hipótese, uma proposta de manejo mais sustentável, desenvolvida com base nas informações colhidas na literatura, visando

ampliar os benefícios econômicos e socioambientais com relação ao refúgio agrícola convencional. A nova abordagem, supostamente mais ecológica, poderia ajudar a despertar o interesse dos produtores e convencê-los sobre a adoção da área de refúgio, visando alcançar benefícios econômicos em curto prazo, como a redução do número das aplicações de inseticidas químicos e de operações com máquinas durante a safra. A hipótese do “bio-refúgio” necessita de estudos e pesquisas a campo, para que possa ser confirmada ou refutada, dada a diversidade de variedades e biotecnologias, biodiversidade, paisagens e condições edafoclimáticas nas regiões produtoras de algodão, milho e soja no Brasil.

Para implementar sistemas de governança que contribuam para a preservação dos benefícios públicos que os cultivos GM com tecnologia Bt proporcionam, assim como desenvolver estratégias de MRI que estimulem o comportamento cooperativo por meio de incentivos seletivos negativos e positivos, como já ocorre nos Estados Unidos e na Austrália (CARRIÈRE, Y. et al., 2019), o trabalho propõe o desenvolvimento de uma política pública para disciplinar a adoção de áreas de refúgio e outras BPA pelos agricultores, assim como promover o CB e o monitoramento de pragas nos sistemas produtivos de algodão, milho e soja no Brasil.

Para contribuir com a jornada de intensificação sustentável dos cultivos de algodão, milho e soja no Brasil, o presente trabalho elaborou propostas que contemplam o desenvolvimento de conteúdos e materiais educativos, ações de transferência de tecnologia, pesquisas em campo para materializar o retorno econômico, ações de empreendedorismo acelerar pesquisas aplicadas e escalar ações comerciais, nova abordagem de comunicação para sustentabilidade, além de recomendar a criação de política pública para promover a sustentabilidade dos cultivos GM com tecnologia Bt, considerando a sua ampla utilização, relevância econômica e socioambiental.

REFERÊNCIAS

AGROCONSULT. **20 anos de transgênicos: benefícios ambientais, econômicos e sociais no Brasil.** São Paulo, 2018.

AGROCONSULT. **Impactos econômicos e socioambientais da tecnologia de resistência a insetos no Brasil: Análise histórica, perspectivas e desafios futuros.** São Paulo, 2018.

ALENCAR, J. A. de et al. Biologia de *Trichogramma pretiosum* Riley em ovos de *Sitotroga cerealella* (Olivier). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 8, pp. 1669-1674, 2000.

ALPHEY, N.; BONSALL, M. B.; ALPHEY, L. S. Combining pest control and resistance management: Synergy of engineered insects with Bt crops. **Journal of Economic Entomology**, 102(2), 717– 732, 2009.

ALPHEY, N.; COLEMAN, P. G.; BONSALL, M. B.; ALPHEY, L. Proportions of different habitat types are critical to the fate of a resistance allele. **Theoretical Ecology**, 1(2), 103– 115, 2008.

ALSTAD, D. N.; ANDOW, D. A. Managing the evolution of insect resistance to transgenic plants. **Science**, 268(5219), 1894–1896, 1995.

ANSHELEVICH, L.; M. KEHAT; E. DUNKELBLUM; GREENBERG, S. Sex pheromone traps for monitoring the European vine moth, *Lobesia botrana*: effect of dispenser type, pheromone dose, field aging of dispenser, and type of trap on male captures. *Phytoparasitica* 22: 281-290, 1994.

ARAGÃO A.; CONTINI, E. **O agro no Brasil e no mundo: uma síntese do período de 2000 a 2020.** Embrapa SIRE, 2020.

ARN, H., and F. LOUIS. **Mating disruption in European vineyards**, pp. 372-382. In R. T. Cardé and A. L. Minks [eds.], **Insect pheromone research**. Chapman; Hall, New York, 1997.

BALLERINI, H.A.; PANNUTI, L.; BALDIN, E.L.L.; FURTADO, L.F. **Biotechnologia Aplicada à Agro&Indústria - Fundamentos e Aplicações**. Toxinas inseticidas de *Bacillus thuringiensis*. (pp.737-774), 2017.

BARRETO, M. R.; GUIMARÃES, C. T.; TEIXEIRA, F. F.; PAIVA, E.; VALICENTE, F. H. Effect of Baculovirus spodoptera isolates in *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) larvae and their characterization by RAPD. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 34, n. 1, p. 67-75, 2005.

BERNARDI, O. et al. **Resistência de insetos-praga a plantas geneticamente modificadas**. Borém, A.; Almeida, G.D. Plantas geneticamente modificadas: desafios e oportunidades para regiões tropicais. Visconde de Rio Branco: Suprema, p. 179-204, 2011.

BERNARDI, O. Avaliação do risco de resistência de lepidópteros-praga (Lepidoptera: Noctuidae) à proteína Cry1Ac expressa em soja MON 87701 x MON 89788 no Brasil. Piracicaba, 2012.

BERNARDI, O. et al. **Manejo da Resistência de Insetos a Plantas Bt**. Edição. PROMIP–Manejo Integrado de Pragas, Engenheiro Coelho, SP, Brasil, 2016.

BOAVENTURA, D.; BUER, B.; HAMAEEKERS, N.; NAUEN, R. Toxicological and molecular profiling of insecticide resistance in a Brazilian strain of fall armyworm resistant to Bt Cry1 proteins. 77(8):3713-3726. *Pest Manag Sci.*, 2021.

BOBROWSKI, V.L.; FIUZA, L.M.; PASQUALI, G.; BODANESE-ZANETTINI, M.H. Genes de *Bacillus thuringiensis*: uma estratégia para conferir resistência a insetos em plantas. *Ciência Rural* 34: 843-850, 2003.

BORGES, G.O. **Resumo histórico do plantio direto no Brasil**. In: Empresa Brasileiro de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. Plantio direto no Brasil. Passo Fundo, Fundação ABC / Aldeia Norte, p.13-18, 1993.

BOTELHO, A. B. R. Z.; SILVA, I. F.; ÁVILA, C. J. Effectiveness reduction of nucleopolyhedrovirus against *Chrysodeixis includens* days after application in soybean plants. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 5, n. 4, p. 94-99, 2018.

BUDIHARTO, W. et al. A Review and Progress of Research on Autonomous Drone in Agriculture, Delivering Items and Geographical Information Systems (GIS). 2nd World Symposium on Communication Engineering (WSCE), 205-209, 2019.

BUENO, R.C.O.F.; BUENO, A.F., CARNEIRO, T.R.; PRATISSOLI, D.; FERNANDES, O.A. Biology and thermal requirements of *Telenomus remus* Nixon (Hymenoptera: Scelionidae) reared on fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) eggs. Cienc Rural. 38:1–6, 2008.

BUENO, A. de F.; SOSA-GOMEZ, D. R.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; MOSCARDI, F.; BUENO, R. C. O. de F. **Inimigos naturais das pragas da soja**. In: HOFFMANN-CAMPO, C. B.; CORRÊA FERREIRA, B. S.; MOSCARDI, F. Soja: manejo integrado de insetos e outros artrópodes praga. Brasília, DF: Embrapa, p. 493-630, 2012.

BUENO, A.de F.; SOSA-GÓMEZ, D.R. Ocorrência de *Rachiplusia nu* e *Crociosema aporema* em soja-Bt na safra 20/21 e principais orientações de manejo aos produtores para a safra 21/22. Londrina, Nota técnica Embrapa Soja, 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cenários e perspectivas da conectividade para o agro / Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação**. Brasília: MAPA/AECS, 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Potencialidades e desafios do agro 4.0: GT III “Cadeias Produtivas e Desenvolvimento de Fornecedores”** Câmara do Agro 4.0 (MAPA/MCTI) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável e Irrigação. – Brasília: Mapa/ACES, 66 p., 2021.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação Comissão Técnica Nacional de Biossegurança. Resumo Geral de Plantas Geneticamente modificadas aprovadas para Comercialização. Disponível em http://ctnbio.mctic.gov.br/liberacao-comercial/-/document_library_display/SqhWdohU4BvU/view/1684467;jsessionid=2EDD3DC75D56C190497322F4C6DD3210.columba#/liberacao-comercial/consultar-processo. Acesso em 12/06/2021.

BRAVO, A.; GILL, S. S.; SOBERON, M. *Bacillus thuringiensis* mechanisms and use. In: GILBERT, L. I.; IATROU, K.; GILL, S. S. (Ed.). **Comprehensive molecular insect science**. New York: Elsevier, v. 6, p. 175-206, 2005.

BROOKES, G.; BARFOOT, P. Environmental impacts of genetically modified (GM) crop use 1996–2018: impacts on pesticide use and carbon emissions, *GM Crops & Food*, 11:4, 215-241, 2020.

CAPALBO, D.M.F.; ARANTES, O.M.N.; SUZUKI, M.T. *Bacillus thuringiensis*. **Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento**. Uberlândia, v. 8, n. 34, p. 76-83, 2005.

CAPRIO, M. A., FAVER, M. K., & HANKINS, G. Evaluating the impacts of refuge width on source-sink dynamics between transgenic and non-transgenic cotton. **Journal of Insect Science**, 4(1), 3, 2004.

CAPRIO, M.A.; SUMMERFORD, D.V.; SIMS, S.R. Evaluating transgenic plants for suitability in pest and resistance management programs, In: LACELY, L.A.; KAYA, H.K.(Ed.) *Field manual of techniques in invertebrate pathology*. Dordrecht: Kluwer Academic, cap. 8 p. 805-828, 2000.

CARRIÈRE, Y. et al. Governing evolution: A socioecological comparison of resistance management for insecticidal transgenic Bt crops among four countries. *Ambio*, v. 49, n. 1, p. 1-16, 21 mar. 2019.

CARVALHO, L. C.; FERREIRA, F. M.; BUENO, N. M. Importância econômica e generalidades para o controle da lagarta falsa-medideira na cultura da soja. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, p. 1021–1033, 2012.

CARVALHO, R. P. L. Danos, flutuação populacional, controle e comportamento de *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797) e susceptibilidade de diferentes genótipos de milho em condições de campo. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 170 f., 1970.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Mensuração econômica da incidência de pragas e doenças no Brasil: uma aplicação para as culturas de soja, milho e algodão**. Parte 1| Piracicaba-SP, 2019. Disponível em https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_EstudoPragaseDoencas_Parte%201.pdf. Acesso em 25/09/2021.

CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em ciência do solo**. - Vol. V (2007) - Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

CHARMILLOT, P.J.; D. HOFER; PASQUIER, D. Attract and kill: a new method for control the codling moth *Cydia pomonella*. *Entomol. Exp. Appl.* 94: 211-216, 2000.

COLMENAREZ, Y.C.; BABENDREIER, D.; WURST, F.R.F. *et al.* The use of *Telenomus remus* (Nixon, 1937) (Hymenoptera: Scelionidae) in the management of *Spodoptera* spp.: potential, challenges and major benefits. *CABI Agric Biosci* 3, 5, 2022.

CONTE, O. *et al.* **Resultados do manejo integrado de pragas da soja na safra 2019/2020 no Paraná** – (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937; n. 431) Londrina: Embrapa Soja, 65 p., 2020.

CORRÊA-FERREIRA, B.S. O controle biológico dos percevejos e sua aplicação no MIP-soja. Folder. Londrina: Embrapa Soja, 2007.

CORRÊA-FERREIRA, B.S. Amostras de pragas da soja. In: HOFFMANN-CAMPO, C.B.; CORRÊA-FERREIRA, B.S.; MOSCARDI, F. (Ed.). Soja: manejo integrado de insetos e outros artrópodes-pragas. Brasília: Embrapa, p. 631-672, 2012.

CORTEZ, M. G. R.; WAQUIL, J. M. Influência de cultivar e nível de infestação de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) no rendimento do sorgo. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, Londrina, v. 26, p. 407- 410, 1997.

CROW, J.F. Genetics of Insecticide Resistance to Chemicals. *Annual Review of Entomology*, 2, 227-246, 1957.

CRUZ, I. **Controle biológico em manejo integrado de pragas**. In: PARRA, J.R.P.; BOTELHO, P.S.M.; CORREA-FERREIRA, B.S.; BENTO, J.M.S. (Ed.). Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores. São Paulo: MANOLE, cap.32, p. 543 – 579, 2002.

CRUZ, I. Controle Biológico de Pragas na Cultura de Milho para Produção de Conservas (Minimilho), por Meio de Parasitoides e Predadores. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica 91. 16p., 2007.

CRUZ, I.; TURPIN, F. T. Yield impact of larval infestation of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to midwhorl stage of corn. **Journal of Economic Entomology**, College Park, v. 76, p. 1052-1054, 1983.

CRUZ, I.; FIGUEIREDO, M. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; VASCONCELOS, C. A. Damage of *Spodoptera frugiperda* (Smith) in different maize genotypes cultivated in soil under three levels of aluminum saturation. **International Journal of Pest Management**, London, v. 45, p. 293-296, 1999.

CRUZ, I.; FIGUEIREDO, L. M. C.; SILVA, R. B.; FOSTER, J. E. Efficiency of chemical pesticides to control *Spodoptera frugiperda* and validation of pheromone trap as a pest management tool in maize crop. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 2, p. 107-122, 2010.

DE MORAES, C.M.de; LEWIS, W.J.; TUMLINSON, J.H. Examining plant-parasitoid interaction in tritrophic systems. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 29, n.2, p. 189-203, 2000.

DIAS, C. N.; JARDIM, F.; SAKUDA, OJIMA, L. (Orgs.) Radar AgTech Brasil 2019: Mapeamento das Startups do Setor Agro Brasileiro. Embrapa, SP Ventures e Homo Ludens: Brasília e São Paulo, 2019.

DOMINIC D REISIG, RYAN KURTZ. Bt Resistance Implications for *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) Insecticide Resistance Management in the United States. **Environmental Entomology**, Volume 47, Issue 6, Pages 1357–1364, 2018.

DUHRUA, S.; GUJAR, G.T. Field-evolved resistance to Bt toxin Cry1Ac in pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae), from India. **Pest Management Science**, Sussex, v. 67, n, 8, p. 898-803, 2011.

DURAIMURUGAN, P.; REGUPATHY A. Mitigation of insecticide resistance in *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera:Noctuidae) by conjunctive use of trap crops, neem and *Trichogramma chilonis* ishii in cotton. **International Journal of Zoological Research**, Faisalabad, v. 1, n. 1, p. 53-58, 2005.

FAO. IPPC Secretariat. Prevention, preparedness, and response guidelines for *Spodoptera frugiperda*. FAO on behalf of the Secretariat of the International Plant Protection Convention. Rome, 2021.

FARIAS, J. R.; ANDOW, D. A.; HORIKOSHI, R. J.; SORGATTO, R. J.; FRESIA, P.; SANTOS, A. C.; OMOTO, C. Field-evolved resistance to Cry1F maize by *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **Crop Protection**, v. 64, p. 150-158, 2014.

FERRÉ, J.; VAN RIE. Biochemistry and genetics of insect resistance to *Bacillus thuringiensis*. **Annual Review of Entomology**, v. 47, p. 501-533, 2002. FFRENCH-CONSTANT, R. H. Which came first: insecticides or resistance? *Trends in Genetics*, v. 23, p. 1-4, 2007.

FERRER, F. Biological of agricultural insect pest in Venezuela; advances, achievements, and future perspectives. **Biocontrol News Inform.** 22:67–74., 2001.

FERRER, F. Biological control of agricultural pests in Venezuela: Historical achievements of Servicio Biológico (SERVBIO). **Revista de Ciencias Ambientales.** 55(1): 327– 44, 2021.

FILIPPINI ALBA, J. M. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. In Bernardi, A. C. C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** Brasília, DF: Embrapa. 84-96, 2014.

FIGUEIREDO, M.L.C; DELLA LUCIA, T.M.C.; CRUZ, I. Controle integrado de *Spodoptera frugiperda* (Smith & Aboth) utilizando-se do parasitoide *Telenomus remus* Nixon. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 34:1975–82, 1999.

FIGUEIREDO, M.; PENTEADO-DIAS, A.; CRUZ, I. Danos provocados por *Spodoptera frugiperda* na produção de matéria seca e nos rendimentos de grãos, na cultura do milho. Sete Lagoas, Embrapa/CNPMS (Comunicado Técnico, 130), 2005.

FIGUEIREDO, S.S.S.; JARDIM, F.; SAKUDA, L.O. **Relatório do Radar Agtech Brasil 2020/2021: Mapeamento das Startups do Setor Agro Brasileiro.** Embrapa, SP Ventures e Homo Ludens: Brasília, 2021.

FITT, G. P. The ecology of *Heliothis* species in relation to agroecosystems. **Annual Review of Entomology**, Palo Alto, v. 34, n. 1, p. 17-52, 1989.

FONTES, E.M.G.; VALADARES-INGLIS, M.C. et al. **Controle biológico de pragas da agricultura.** Brasília, DF: Embrapa, 510 p., 2020.

GARCIA, A. G. Computational modeling to describe the dynamics of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in Bt crop areas / Adriano Gomes Garcia, - - Piracicaba, 2017.

GASSMANN, A. J.; PETZOLD-MAXWELL, J. L.; KEWESHAN, R. S.; DUNBAR, M. W. Field-evolved resistance to Bt maize by western corn rootworm. **PLoS ONE**, 6(7), e22629, 2011.

GASSMANN, A. J.; STOCK, S. P.; SISTERTSON, M. S.; CARRIÈRE, Y.; TABASHNIK, B. E. Synergism between entomopathogenic nematodes and *Bacillus thuringiensis* crops: Integrating biological control and resistance management. **Journal of Applied Ecology**, 45(3), 957– 966, 2008.

GAZZONI, D. L. A sustentabilidade da soja no contexto do agronegócio brasileiro e mundial. (Embrapa Soja. Documentos, 344). Londrina: Embrapa Soja, 50 p., 2013.

GENTILE, J. E.; RUND, S. S.; & MADEY, G. R. Modelling sterile insect technique to control the population of *Anopheles gambiae*. *Malaria Journal*, 14, 92, 2015.

GOERGEN, G.; KUMAR, P. L.; SANKUNG, S. B.; TOGOLA, A.; TAMÒ, M. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa, 2016.

GEORGHIOU, G.P. **Principles of insecticide resistance management**. Phytoprotection, vol. 75, n° 4, California, p. 51-59, 1994.

GOATER, B.; RONKAY, L.; FIBIGER, M. Noctuidae Europeae. Soro: Entomological Press, 452 p., 2003.

GOULD, F. Sustainability of transgenic insecticidal cultivars: Integrating pest genetics and ecology. **Annual Review of Entomology**, 43, 701– 726, 1998.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. **Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão**. In BERNARDI, A. C. C. et al. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa. 74-83, 2014.

GRYSPEIRT, A.; GREGOIRE, J. C. Effectiveness of the high dose/refuge strategy for managing pest resistance to *Bacillus thuringiensis* (Bt) plants expressing one or two toxins. *Toxins*, 4(10), 810– 835, 2012.

BROOKES, G.; BARFOOT, P. Environmental impacts of genetically modified (GM) crop use 1996–2018: impacts on pesticide use and carbon emissions, *GM Crops & Food*, 11:4, 215-241, 2020.

GREGG, P.C; SOCORRO, A.P.D.; HAWES, A.J.; BINNS, M.R. Developing Bisexual Attract-and-Kill for Polyphagous Insects: Ecological Rationale versus Pragmatics. **Journal of Chemical Ecology**, New York, p. 666-675, 2016.

GRZYWACZ, D. Basic and applied research: Bauclovirus. In.: LACEY, L. A. **Microbial control of insect and mite pests**. London: Academic Press, p. 27-46, 2017.

HASSAN, S.A. Mass production of *Trichogramma*: breeding of the angoumois grain moth *Sitotroga cerealella* (Oliv.) as an alternative host. In: PARRA, J.R.P.; ZUCCHI, R.O. (Org.). Curso de controle biológico com *Trichogramma*. Piracicaba: ESALQ, p.45-64, 1996.

HASSAN, S.A. Criação da traça do milho, *Sitotroga cerealella*, para a produção massal de *Trichogramma*. In PARRA, J.R.P. & ZUCHI, R.A. (Orgs.), *Trichogramma e o Controle Biológico Aplicado*. Piracicaba: FEALQ. 173-182, 1977.

HERNÁNDEZ, D.; FERRER, F.; LINARES, B. Introducción de *Telenomus remus* Nixon (Hym: Scelionidae) para controlar *Spodoptera* año (Lep: Noctuidae) en Yaritagua. Venezuela Agron Trop. 39: 199–205, 1989.

HERNIOU, E. A.; ARIF, B. M.; BECNEL, J. J.; BLISSARD, G. W.; BONNING, B.; HARRISON, R.; JEHLE, J. A.; THEILMANN, D. A.; VLAK, J. M. Family Baculoviridae. In: KING, A. M. Q.; ADAMS, M. J.; CARSTENS, E. B.; LEFKOWITZ, E. J. (Ed.). *Virus taxonomy: classification and nomenclature of viruses: ninth report of the International Committee on Taxonomy of Viruses*. Amsterdam: Elsevier Academic Press, p. 163-173, 2012.

HOFFMANN-CAMPO, C.B. et al. **Pragas da soja no Brasil e seu manejo integrado**. (Circular Técnica / Embrapa Soja, ISSN 1516-7860; n.30). Londrina: Embrapa Soja, 70p., 2000.

HORIKOSHI, R. J. et al. Effective dominance of resistance of *Spodoptera frugiperda* to *Bt* maize and cotton varieties: Implications for resistance management. *Sci. Rep.* 6, 1–8, 2016.

HORIKOSHI, R.J., BERNARDI, O., GODOY, D.N. et al. Resistance status of lepidopteran soybean pests following large-scale use of MON 87701 × MON 89788 soybean in Brazil. *Sci Rep* 11, 21323, 2021.

HUANG, F.; ANDOW, D.A.; BUSCHMAN, L.L. Success of the high-dose refuge resistance management strategy after 15 years of *Bt* crop use in North America. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, Dordrecht, v. 140, n. 1, p. 1-16, 2011.

HUANG, F.; QURESHI, J.A.; MEAGHER, R.L. JR.; REISIG, D.D.; HEAD, G.P.; et al. Cry1F Resistance in Fall Armyworm *Spodoptera frugiperda*: Single Gene versus Pyramided Bt Maize. PLOS ONE 9(11): e112958, 2014.

HULL, L.A.; BEERS, E.H. Ecological selectivity: modifying chemical control practices to preserve natural enemies. In: HOY, M.A.; HERZOG, D.C. (Ed.). Biological control in agricultural IPM Systems. Orlando: Academic Press, p.103 -122, 1985.

HUTCHISON, W. D.; BURKNESS, E. C.; MITCHELL, P. D.; MOON, R. D.; LESLIE, T. W.; FLEISCHER, S. J.; AUN, E. S. Areawide suppression of European corn borer with Bt maize reaps savings to non-Bt maize growers. **Science**, 330(6001), 222– 225, 2010.

IPPC Secretariat. Scientific review of the impact of climate change on plant pests – **A global challenge to prevent and mitigate plant pest risks in agriculture, forestry and ecosystems**. FAO on behalf of the IPPC Secretariat. Rome, 2021.

Insect Resistance Management for Bt Plant-Incorporated Protectants. Disponível em: <https://www.epa.gov/regulation-biotechnology-under-tsca-and-fifra/insect-resistance-management-bt-plant-incorporated>. Acesso em 12/06/2021.

ISAAA. **Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops in 2019**: Biotech Crops Drive Socio-Economic Development and Sustainable Environment in the New Frontier. ISAAA Brief No. 55. ISAAA: Ithaca, NY, 2019.

JEGER, M.; BRAGARD, C.; CAFFIER D.; CANDRESSE T.; CHATZIVASSILIOU E.; DEHNEN-SCHMUTZ K., et al. Pest categorisation of *Spodoptera frugiperda*. EFSA J. 2017.

JORGE, L. A. de C.; INAMASU, R.Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, p. 109-134, 2014.

KARG, G.; SAUER, A. E. Seasonal variation of pheromone concentration in mating disruption trials against European grape vine moth *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) measured by EAG. J. Chem. Ecol. 23: 487-501, 1997.

KING, E. G.; COLEMAN, R. J. Potential for biological control of *Heliothis* species. **Annual Review of Entomology**, Palo Alto, v. 34, n. 1, p. 53-75, 1989.

KOREN, L. M. Produtividade máxima econômica de grãos de soja no Brasil: um estudo sobre a relação entre a estrutura de custos e receitas do produtor de soja em grão e a produtividade observada no campo / Lucas Magro Koren. - 77f., 2022.

KRUGER, M.; VAN RENSBURG, J.; VAN DEN BERG, J. Resistance to Bt maize in *Busseola fusca* (Lepidoptera: Noctuidae) from Vaalharts, South Africa. **Environmental Entomology**, 40(2), 477– 483, 2011.

KUMAR, S.; SAINI, S. K.; RAM, P. Natural mortality of *Helicoverpa armigera* (Hübner) eggs in the cotton ecosystem. **Journal of Agricultural Science and Technology**, Libertyville, v. 11, n. 1, p. 17-25, 2009.

KUSS, C. C.; ROGGIA, R. C. R.; BASSO, C. J.; OLIVEIRA, M.C.N.; PIAS, O.H.C; ROGGIA, S. Controle de *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) em soja com inseticidas químicos e biológicos. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.51, n.5, p.527-536, 2016.

LABBE, P.; LENORMAND, T.; RAYMOND, E.M. On the worldwide spread of an insecticide resistance gene: a role for local selection. **Journal of Evolutionary Biology**, Basel, v. 18, n. 6, p. 1471-1484, 2005.

LAMPARELLI, R. A. C. **Agricultura de precisão**. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2016.

LIMA, E.R.; DELLA LUCIA, T.M.C. Biodinâmica dos Feromônios In: Vilela, E.F., Della Lucia (eds.), **Feromônios de Insetos, Biologia, química e emprego no manejo de pragas**, São Paulo, Holos Editora, p. 13-26, 2001.

MACHADO, E. P. et al. Cross-crop resistance of *Spodoptera frugiperda* selected on Bt maize to genetically-modified soybean expressing Cry1Ac and Cry1F proteins in Brazil. *Sci. Rep.* 10, 1–9, 2020.

McCAFFERY, A. R. et al. Studies on resistance to insecticides in the cotton bollworm *Heliothis armigera* with special reference to the pyrethroids. In: BRITISH CROP PROTECTION CONFERENCE ON PESTS AND DISEASES, 1986, Brighton. Proceedings. Brighton: BCPC, p. 591-598, 1986.

MEIRELLES, F. S. Pesquisa Anual do Uso de TI nas Empresas, FGVcia: Centro e Tecnologia de Informação Aplicada da EAESP, 30ª edição, 2019.

MORAES, R.R. de; LOECK, A.E.; BELARMINO, L.C. Flutuação populacional de Plusiinae e *Anticarsia gemmatalis* Hübner, 1818 (Lepidoptera: Noctuidae) em soja no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, p. 51-56, 1991.

MORAL GARCIA, F. J. Analysis of the spatiotemporal distribution of *Helicoverpa armigera* (Hübner) in a tomato field using a stochastic approach. *Biosystems Engineering*, Bedford, v. 93, n. 3, p. 253-259, 2006.

MORALES, L.; SILVA, M.T.B. da. Desafios do MIP Soja na região sul do Brasil e o plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 4., 2006, Londrina. Anais... Londrina: Embrapa Soja, p.134-139, 2006.

MOSCARDI, F. Assessment of the application of baculoviruses for control of Lepidoptera. **Annual Review of Entomology**, Palo Alto, v. 44, p. 257-289, 1999.

MOSCARDI, F. Problemática das populações dos insetos pragas em desequilíbrio e a retomada do MIP. XXX Reunião de Pesquisa de soja da região central do Brasil, Rio Verde: Embrapa Soja, Documentos 310, p. 85-89, 2008.

MOSCARDI, F.; SOUZA, M. L. Baculovírus para o controle de pragas: Panacéia ou realidade? **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, Brasília, ano IV, n. 24, p. 22-29, 2002.

OLIVEIRA, C. M.; AUAD, A. M.; MENDES, S. M.; FRIZZAS, M. R. Crop losses and the economic impact of insect pests on Brazilian agriculture. **Crop Protection**, 56, 50– 54, 2014.

OLIVEIRA, D. H. R. Patogenicidade e virulência de *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae* a *Euschistus heros* (Hemiptera: Pentatomidae). Dois Vizinhos: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

OMOTO, C.; BERNARDI, O.; SALMERON, E.; SORGATTO, R. J.; DOURADO, P.M.; CRIVELLARI, A.; CARVALHO, R. A.; WILLSE, A.; MARTINELLI, S.; HEAD, G. P. Field-evolved resistance to Cry1Ab maize by *Spodoptera frugiperda* in Brazil, Pages 1727-1736, 2016.

PARRA, J.R.P. Mass rearing of egg parasitoids for biological control programs. In: Consoli, F.L., Parra, J.R.P. & Zucchi, R.A. (Orgs.), Egg parasitoids in Agroecosystems with emphasis on *Trichogramma* Heidelberg: Springer. 267-292, 2010.

PARRA, J.R.P. Biological Control in Brazil: An overview. **Scientia Agricola**, 71(5), 420-429, 2014.

PARRA, J.R.P. et al. **Controle Biológico no Brasil com parasitoides e predadores na agricultura brasileira**. Piracicaba: FEALQ, 592 p., 2021.

PENG, Q.; Yu, Q.; Song, F. Expression of cry genes in *Bacillus thuringiensis* biotechnology. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019.

PEREIRA, A.I.A. Coletânea nacional sobre entomologia 2. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020.

PESSOA, M. C. P. Y. et al. Nível de dano de *Helicoverpa armigera* em fase vegetativa de soja (safra 2016/2017) em Ponta Porã / Maria Conceição Peres Young Pessoa... [et al.]. – Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019.

PIRES, J. L. F.; CUNHA, G. R.; PASINATO, A.; FRANÇA, S., RAMBO, L. Discutindo agricultura de precisão – aspectos gerais. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004.

PHYLLIS, A. W.; Martin, Edson Hirose; Jeffrey R. Aldrich, Toxicity of *Chromobacterium subtsugae* to Southern Green Stink Bug (Heteroptera: Pentatomidae) and Corn Rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae), *Journal of Economic Entomology*, Volume 100, Issue 3, 1, Pages 680–684, 2007.

POGUE, M. G. A new synonym of *Helicoverpa zea* (Boddie) and differentiation of adult males of *H. zea* and *H. armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae: Heliiothinae). *Annals of the Entomological Society of America*, Lexington, v. 97, n. 6, p. 1222-1226, 2004.

POMARI, A.F.; BUENO, A.F.; BUENO R.C.O.F; MENEZES JUNIOR, A.O. Biological Characteristics and thermal requirements of the biological control agent *Telenomus remus* (Hymenoptera: Platygasteridae) reared on eggs of different species of the genus Spodoptera (Lepidoptera: Noctuidae). *Ann Entomol Soc Am*. 105:73–81, 2012.

POMARI, A.F.; BUENO, A.F.; BUENO, R.C.O.F; MENEZES JUNIOR, A.O. *Telenomus remus* Nixon egg parasitization of three species of Spodoptera under different temperatures. *Neotrop Entomol.* 42:399–406, 2013.

POMARI-FERNANDES, A.; BUENO, A.F.; DE BORTOLI, S.A.; FAVETTI, B.M. Dispersal capacity of the egg parasitoid *Telenomus remus* Nixon (Hymenoptera: Platygastri- dae) in maize and soybean crops. *Biol Control.* 126:158–68, 2018.

PRADO, H. Precisão na agricultura. **Revista Fonte:** Tecnologia da Informação na Gestão Pública. Belo Horizonte, 15 (20), 46-48, 2018.

RABB, R.L.; STINNER, R.E.; BOSCH, R. van den. Conservation and augmentation of natural enemies. In: HUFFAKER, C.B.; MESSENGER, P.S. (Ed.). *Theory and practice of biological control.* New York: Academic Press, p. 233 – 254, 1976.

REED, W. *Heliothis armigera* (Hb.) (Noctuidae) in western Tanganyika: II. Ecology and natural and chemical control. *Bulletin of Entomological Research*, Cambridge, v. 56, n. 1, p. 127-140, 1965.

REAVEY, C.E.; WALKER, A.S.; JOYCE, S.P. et al. Self-limiting fall armyworm: a new approach in development for sustainable crop protection and resistance management. *BMC Biotechnol* 22, 5, 2022.

RIDGWAY, R.L.; VINSON, S.B. *Biological control by augmentation of natural enemies.* New York: Plenum Press, 480 p., 1977.

RIFFEL, A.; OLIVEIRA, J.S.; SANTANTA, A.E.G. Semioquímicos de plantas: integração da ecologia química e molecular no estudo da resposta da cana-de-açúcar à herbivoria. VIII Encontro Brasileiro de Ecologia Química, 2013.

SANTOS, W. J. Manejo de pragas do algodão com ênfase no cerrado, pp. 495–566. In E. C. Freire (eds.), *Algodão no cerrado do Brasil.* Associação Brasileira de Produtores de Algodão. Aparecida de Goiás, GO: ABRAPA, 2011.

SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Grãos: Manejo Integrado de Pragas (MIP) em soja, milho e sorgo.** Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR). - 2. ed. Brasília: SENAR, 2018.

SILVA, A. G. A.; GONÇALVES, C. R.; GALVÃO, D. M.; GONÇALVES, A. J. L.; GOMES, J.; SILVA, M. N.; SIMONI, L. Quarto catálogo dos insetos que vivem nas plantas do Brasil: Seus parasitos e predadores, Parte II, tomo 1o, Insetos, hospedeiros e inimigos naturais. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1968.

SILVA, D.M. Modelagem Matemática Aplicada ao Controle e Manejo Integrado de Pragas em Lavouras do Milho / Dager Moreira da Silva; Yoissell Rodríguez Núñez, orientador; Panters Rodríguez Bermúdez, coorientador. Volta Redonda, 2019.

SILVA, W.; MANN, R. Agricultura de Precisão no Brasil: conjuntura atual, desafios e perspectivas. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 11, e1979119603, 2020.

SMITH, S.M. Biological Control with *Trichogramma*: Advances, Successes, and Potential of Their Use. *Annual Review of Entomology*, 41(1), 375-406, 1996.

SORGATTO, R.J.; BERNARDI, O., OMOTO, C. Survival and Development of *Spodoptera frugiperda* and *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae) on Bt Cotton and Implications for Resistance Management Strategies in Brazil, **Environmental Entomology**, Volume 44, Issue 1, Pages 186–192, 2015.

SOSA-GÓMEZ, D.R.; CORRÊA-FERREIRA, B.S.; HOFFMANN-CAMPO, C.B.; CORSO, I.C.; OLIVEIRA, L.J.; MOSCARDI, F.; PANIZZI, A.R.; BUENO, A. de F.; HIROSE, E. **Manual de identificação de insetos e outros invertebrados da cultura da soja**. (Embrapa–CNPSo. Documentos, 269). Londrina: Embrapa-CNPSo, 90 p., 2010.

SOUZA, C. S. F. et al. Efficiency of biological control for fall armyworm resistant to the protein Cry1F. **Brazilian Journal of Biology**. v. 81, n. 1, pp. 154-163, 2021.

STORER, N. P., KUBISZAK, M. E., ED KING, J., THOMPSON, G. D., & SANTOS, A. C. Status of resistance to Bt maize in *Spodoptera frugiperda*: Lessons from Puerto Rico. **Journal of Invertebrate Pathology**, 110(3), 294– 300, 2012.

TABASHNIK, B. E. Evolution to resistance to *Bacillus thuringiensis*. **Annual Review of Entomology**, Stanford, v. 39, p. 47-79, 1994.

TABASHNIK, B.E.; LIU, Y.B.; MALVAR, T.; HECKEL, D.G.; MASSON, L.; BALLESTER, V.; GRANELO, F.; MENSURA, J.L.; FERRÉ, J. Global variation in the genetic and biochemical basis of diamondback moth resistance to *Bacillus thuringiensis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Washington, n. 94, n.24, p. 12780-12785, 1997.

TABASHNIK, B. E.; GASSMANN, A. J.; CROWDER, D. W.; CARRIÈRE, Y. Insect resistance to Bt crops: Evidence versus theory. **Nature Biotechnology**, 26(2), 199– 202, 2008.

TABASHNIK, B. E.; VAN RENSBURG, J. B. J.; CARRIÈRE, Y. Field-evolved insect resistance to Bt crops: Definition, theory, and data. **Journal of Economic Entomology**, 102(6), 2011– 2025, 2009.

TABASHNIK, B. E. “Delaying insect resistance to transgenic crops.” **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** vol. 105,49: 19029-30, 2008.

TANADA, Y.; KAYA, H. K. **Insect pathology**. San Diego: Academic Press, 666 p., 1993.

TAY W.T.; SORIA M.F.; WALSH T.; THOMAZONI D.; SILVIE P. et al. A Brave New World for an Old World Pest: *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. Editor: Michael Knapp, Bangor University, United Kingdom, 2013.

THOMAS, D. D., DONNELLY, C. A., WOOD, R. J., & ALPHEY, L. S. Insect population control using a dominant, repressible, lethal genetic system. *Science*, 287(5462), 2474– 2476, 2000.

TYUTYUNOV, Y.; ZHADANOVSKAYA, E.; BOURGUET, D.; ARDITI, R. Landscape refuges delay resistance of the European corn borer to Bt-maize: A demo-genetic dynamic model. **Theoretical Population Biology**, 74(1), 138– 146, 2008.

UESINK, W.G.; KOGAN, M. The quantitative basis of pest management: Sampling and measuring. In: METCALF, R.; LUCKMANN, W.H. (Ed.). **Introduction to insect pest management**, New York: John Wiley & Sons, p. 315-352, 1982.

VALICENTE, F. H.; COSTA, E. F. Controle biológico da lagarta do cartucho, *Spodoptera frugiperda*, com *Baculovirus spodoptera* via água de irrigação. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, Londrina, v. 24, p. 61-67, 1995.

VALICENTE, F. H.; CRUZ, I. Controle biológico da lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda*, com o baculovírus. (Circular Técnica, 15). Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 23p., 1991.

VALICENTE, F. H.; TUELHER, E. S. Controle biológico da lagarta do cartucho, *Spodoptera frugiperda*, com baculovirus. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2009. 14p. (Circular Técnica, 114). VALICENTE, F. H.; TUELHER, E. S.; BARROS, E. C. Processo de formulação do *Baculovirus spodoptera* em pó molhável. (Circular Técnica, 156). Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 5p., 2010.

VALICENTE, F. H.; TUELHER, E. S.; BARROS, E. C. Processo de produção comercial de baculovírus em grande escala. (Circular Técnica, 157). Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 6p., 2010.

VALICENTE, F. H.; TUELHER, E. S.; PAIVA, C. E. C.; GUIMARÃES, M. R. F.; MACEDO, C. V.; WOLFF, L. C. A new baculovirus isolate that does not cause the liquefaction of the integument in *Spodoptera frugiperda* dead larvae. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas: v. 7, n. 1, p. 77-82, 2008.

VAN LENTEREN, J.C. The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57(1), 1-20, 2012.

WAQUIL, J. M.; VILLELA, F. M. F.; FOSTER, J. E. Resistência do milho (*Zea mays* L.) transgênico (Bt) a lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas: v. 1, n. 3, p. 1-11, set./dez. 2002.

WENGRAT, A.P.G.S.; COELHO JUNIOR, A.; PARRA, J.R.P.; TAKAHASHI, T.A.; FOERSTER, L.A.; CORRÊA, A.S.; POLASZEK, A.; JOHNSON, N.F.; COSTA, V.A.; ZUCCHI, R.A. Integrative taxonomy and phylogeography of *Telenomus remus* (Scelionidae), with the first record of natural parasitism of *Spodoptera* spp. in Brazil. *Sci Rep.* 11:14110, 2021.

WILLIAMS, W. P.; DAVIS, F. M. Response of corn to artificial infestation with fall armyworm and southwestern corn borer larvae. *Southwestern Entomologist*, College Station, v.15, p.163-166, 1990.

WITZGALL, P., KIRSCH, P. & CORK, A. Sex pheromones and their impact on pest management, **Journal of Chemical Ecology**, 36, 80-100, 2010.

YNG, Y.; LI, Y.; WU, Y. Current Status of Insecticide Resistance in *Helicoverpa armigera* After 15 Years of Bt Cotton Planting in China. **Journal of Economic Entomology**, Volume 106, Issue 1, 1, Pages 375–381, 2013.

ZALUCKI, M. P. et al. The biology and ecology of *Helicoverpa armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia: what do we know? **Australian Journal of Zoology**, Melbourne, v. 34, n. 6, p. 779-814, 1986.

ZHANG, H.; TIAN, W.; ZHAO, J.; JIN, L.; YANG, J.; LIU, C.; WU, Y. Diverse genetic basis of field-evolved resistance to Bt cotton in cotton bollworm from China. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 109(26), 10275–10280, 2012.

ZHANG, H.; YIN, W.; ZHAO, J.; JIN, L.; YANG, Y.; WU, S.; WU, Y. Early warning of cotton bollworm resistance associated with intensive planting of Bt cotton in China. **PLoS ONE**, 6(8), e22874, 2011.

ZHOU, L.; ALPHEY N.; WALKER, A.S., TRAVERS, L.M., HASAN, F.; MORRISON, N.I.; BONSALE, M.B.; RAYMOND, B. Combining the high-dose/refuge strategy and self-limiting transgenic insects in resistance management—a test in experimental mesocosms. **Evol Appl** 11(5):727–738, 2018.

ZUCCHI, R.A.; MONTEIRO, R.C. O gênero *Trichogramma* na América do Sul. In: PARRA, J.R.P.; ZUCCHI, R.A. (Ed.). *Trichogramma e o controle biológico aplicado*. Piracicaba: FEALQ. cap.2, p.41-66, 1997.

ZULIN, D.; ÁVILA, C. J.; SCHLICK-SOUZA, E. C. Population fluctuation and vertical distribution of the soybean looper (*Chrysodeixis includens*) in soybean culture. **American Journal of Plant Sciences**, v. 9, n. 7, p. 1544–1556, 2018.