ReGeo ISSN: 2177-3246

EFICÁCIA DA PROTEÍNA VIP3AA NO MANEJO DE *Spodoptera frugiperda* EM ALGODOEIRO

EFFECTIVENESS OF VIP3AA PROTEIN IN THE MANAGEMENT OF *Spodoptera frugiperda* IN COTTON

EFICACIA DE LA PROTEÍNA VIP3AA EN EL CONTROL DE *Spodoptera frugiperda* EN EL ALGODONERO

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-059

Data de submissão: 07/07/2026 **Data de publicação:** 07/08/2026

Márcio Victor Gonçalves dos Santos
Mestre em Bioenergia e Grãos
Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano)
E-mail: marcio.goncalves@estudante.ifgoiano.edu.br

Luciano Nogueira
Doutor em Agronomia
Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano)
E-mail: luciano.nogueira@ifgoiano.edu.br

Adriano Jakelaitis
Doutor em Fitotecnia
Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano)
E-mail: adriano.jakelaitis@ifgoiano.edu.br

Jardel Lopes Pereira
Doutor em Fitotecnia
Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano)
E-mail: jardel.pereira@ifgoiano.edu.br

RESUMO

A lagarta-militar (*Spodoptera frugiperda*) destaca-se como uma das principais ameaças à cotonicultura brasileira, sendo o uso de variedades algodão Bt a estratégia central para mitigar danos e reduzir o uso de inseticidas químicos. Contudo, a evolução da resistência, impulsionada pelo manejo inadequado de áreas de refúgio, ameaça a longevidade dessa biotecnologia. Este estudo avaliou a eficácia da proteína Vip3Aa comparando uma população de campo de Luís Eduardo Magalhães (BA) com uma linhagem de referência da Embrapa. Os resultados comprovaram a elevada eficiência da tecnologia Vip3Aa, que promoveu níveis de mortalidade próximos a 100% após 168 horas de exposição, tanto em folhas quanto em botões florais. Diferente do hipotetizado, a população de campo apresentou alta suscetibilidade, indicando que a frequência de alelos de resistência permanece baixa na região. Essa ausência de sobreviventes inviabilizou a mensuração do custo adaptativo associado à resistência nesta pesquisa. Conclui-se que a tecnologia permanece eficaz, mas a manutenção de áreas de refúgio estruturado e a adoção do Manejo Integrado de Pragas (MIP) são vitais para preservar a durabilidade das proteínas Bt no campo.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum*. Algodão Transgênico. Cry.

ABSTRACT
The fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) stands out as one of the main threats to Brazilian cotton farming, with the use of Bt cotton varieties being the central strategy to mitigate damage and reduce the use of chemical insecticides. However, the evolution of resistance, driven by inadequate management of refuge areas, threatens the longevity of this biotechnology. This study evaluated the efficacy of the Vip3Aa protein by comparing a field population from Luís Eduardo Magalhães (BA) with a reference strain from Embrapa. The results proved the high efficiency of Vip3Aa technology, which promoted mortality levels close to 100% after 168 hours of exposure, both in leaves and in floral buds. Contrary to what was hypothesized, the field population showed high susceptibility, indicating that the frequency of resistance alleles remains low in the region. This absence of survivors made it impossible to measure the adaptive cost associated with resistance in this research. It is concluded that the technology remains effective, but the maintenance of structured refuge areas and the adoption of Integrated Pest Management (IPM) are vital to preserve the durability of Bt proteins in the field.

Keywords: *Gossypium hirsutum*. Transgenic Cotton. Cry.

RESUMEN
La oruga cogollera del maíz (*Spodoptera frugiperda*) se destaca como una de las principales amenazas para el cultivo de algodón en Brasil, siendo el uso de variedades de algodón Bt la estrategia central para mitigar los daños y reducir el uso de insecticidas químicos. Sin embargo, la evolución de la resistencia, impulsada por un manejo inadecuado de las áreas de refugio, amenaza la longevidad de esta biotecnología. Este estudio evaluó la eficacia de la proteína Vip3Aa comparando una población de campo de Luís Eduardo Magalhães (BA) con una línea de referencia de Embrapa. Los resultados confirmaron la alta eficiencia de la tecnología Vip3Aa, que promovió niveles de mortalidad cercanos al 100% después de 168 horas de exposición, tanto en hojas como en botones florales. Contrario a lo hipotetizado, la población de campo mostró alta susceptibilidad, lo que indica que la frecuencia de alelos de resistencia sigue siendo baja en la región. Esta falta de sobrevivientes imposibilitó la medición del costo adaptativo asociado a la resist encia en esta investigación. Se concluye que la tecnología sigue siendo eficaz, pero el mantenimiento de áreas de refugio estructuradas y la adopción del Manejo Integrado de Plagas (MIP) son vitales para preservar la durabilidad de las proteínas Bt en el campo.

Palabras clave: *Gossypium hirsutum*. Algodón Transgénico. Cry.

1 INTRODUÇÃO

A lagarta-militar, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae), é uma das principais pragas agrícolas das Américas, apresentando elevada capacidade reprodutiva, mobilidade e adaptação a diversos hospedeiros, como milho, soja e algodão (Montezano *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2021; Farias *et al.*, 2014). No cenário brasileiro, os danos causados por essa praga no algodoeiro comprometem significativamente a área fotossintética e a qualidade da fibra, resultando em prejuízos econômicos expressivos (Czepak *et al.*, 2013).

Desde a introdução do algodão transgênico no Brasil em 2005, a principal estratégia de manejo tem sido o uso de variedades geneticamente modificadas (Bt), que em 2022 ocuparam cerca de 86% da área total cultivada no país (Isaaa, 2022). Essas tecnologias expressam proteínas inseticidas como Cry e Vip3Aa, que visam a supressão de lepidópteros e a redução do uso de defensivos químicos (Wu *et al.*, 2008; Bayer, 2022). Entretanto, a pressão de seleção contínua tem acelerado a evolução da resistência da praga, especialmente às proteínas de gerações anteriores, como Cry1F e Cry1Ab (Omoto *et al.*, 2016; Bernardi *et al.*, 2015).

A proteína Vip3Aa representa a última geração de tecnologia Bt aprovada no Brasil pela Comissão Técnica Nacional de Biossegurança em 2018 (CTNBio, 2018). Contudo, casos recentes de resistência em populações de campo em estados como Mato Grosso e Bahia já foram documentados (Revista Cultivar, 2025). Diante deste cenário, torna-se crucial avaliar não apenas a eficácia da tecnologia, mas também o custo adaptativo associado à resistência, fator que influencia diretamente a persistência de indivíduos resistentes em áreas de refúgio e a longevidade das tecnologias transgênicas no campo (Bernardi *et al.*, 2015; Santos-Amaya *et al.*, 2016).

Portanto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a eficácia da proteína Vip3Aa no controle da *Spodoptera frugiperda* em cultivares de algodão, contribuindo para o entendimento dos impactos da possibilidade de evolução da resistência na dinâmica populacional da praga e no manejo integrado de pragas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O algodão (*Gossypium* L.) é amplamente cultivado em regiões tropicais e subtropicais devido ao alto valor econômico de sua fibra natural. Dentre as espécies conhecidas, a *Gossypium hirsutum* destaca-se por representar aproximadamente 90% da produção mundial, graças à sua elevada produtividade e adaptabilidade (FAO, 2023). O Brasil consolidou uma posição de destaque global, atingindo a marca de maior exportador na safra 2023/24, com uma produção estimada em 3,7 milhões de toneladas de pluma (USDA, 2023; Revista Cultivar, 2024).

Apesar desse desempenho, a cotonicultura internacional enfrenta desafios estruturais severos, como o alto consumo hídrico e o uso intensivo de fertilizantes e pesticidas, o que tem motivado a adoção de cultivares geneticamente modificadas, como o algodão Bt, para o controle de pragas e redução no uso de inseticidas (ICAC, 2020; Zhang *et al*., 2023).

A lagarta-militar, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797), é originária das Américas e se tornou uma ameaça global à segurança alimentar (Tay *et al*., 2023). Esta espécie é reconhecida por sua polifagia, alimentando-se de mais de 350 espécies de plantas, com preferência por milho e algodão (Tay *et al*., 2023). Sua biologia favorece o rápido estabelecimento em novas áreas devido à alta capacidade reprodutiva, ciclo de vida curto e grande dispersão por voo (Yu *et al*., 2021; Silva *et al*., 2024).

No milho, os danos podem acarretar perdas de até 50% na produtividade, enquanto no algodoeiro a praga ataca folhas, maçãs novas e estruturas reprodutivas, comprometendo severamente a qualidade da fibra (Czepak *et al*., 2013; Chisonga *et al*., 2023). O manejo da lagarta-militar na cultura do algodão deve ser baseado no conceito de Manejo Integrado de Pragas (MIP), combinando controle com agentes biológicos, práticas culturais e uso criterioso de inseticidas. Paralelamente a isso, o manejo correto dos restos culturais também colabora para interromper o ciclo da praga. (Embrapa, 2024).

Desde 2005, a introdução de variedades que expressam proteínas de *Bacillus thuringiensis* (Bt) tornou-se a estratégia central para o manejo desta praga no Brasil (Isaaa, 2022). Geralmente os cultivares de algodão transgênico que expressam a proteína Vip3Aa19, vêm em pirâmide com outras proteínas Bt, como Cry1Ac ou Cry1F são avaliados como alternativa promissora para controle de lepidópteros resistentes a Bt tradicionais (Silva *et al.* 2024).

A proteína Vip3Aa, integrante da última geração dessas tecnologias, foi aprovada no país em 2018 (CTNBio, 2018). Ela se diferencia das proteínas Cry por possuir um local de ligação distinto no intestino do inseto, o que ajuda a evitar a resistência cruzada (Sena, Hernández-Rodríguez & Ferré, 2009; Silva *et al*., 2024). Contudo, a pressão de seleção contínua já resultou em casos de resistência à Vip3Aa em regiões produtoras de Mato Grosso e Bahia (Revista Cultivar, 2025).

A durabilidade da tecnologia Vip3Aa19 depende da adoção de estratégias de manejo da resistência, como áreas de refúgio, rotação de genes Bt, integração com controle biológico, monitoramento da suscetibilidade das pragas e práticas culturais. Embora apresente alto potencial, seu uso responsável é essencial para preservar sua eficácia ao longo do tempo.

A adoção de cultivares transgênicos que expressam proteínas inseticidas pressionam as populações de insetos-praga a desenvolverem resistência. Como parte desse processo pode haver o

aparecimento ou aumento de alelos de resistência permitindo que inseto sobreviva ou se reproduza em plantas modificadas. No entanto, muitas vezes essas adaptações carregam consigo um custo adaptativo, ou seja, indivíduos portadores dos alelos de resistência podem ter menor aptidão em ambientes em que o gene inseticida não está presente ou em hospedeiros alternativos (refúgios) (Hackett & Bonsall, 2016).

Este custo adaptativo se manifesta por compensações biológicas, de modo que, embora o inseto sobreviva no cultivar transgênico, ele cresce mais lentamente, produz menos descendentes ou sofre maior mortalidade em plantas convencionais. Em um estudo recente, verificou-se que populações de *S. frugiperda* resistentes a um cultivar de milho Bt (Cry1A.105 + Cry2Ab2) apresentaram redução significativa na aptidão em plantas hospedeiras menos adequadas, evidenciando que o custo adaptativo pode ser amplificado sob condições desfavoráveis para o inseto (Santos-Amaya *et al*. 2022).

Isso impede que os alelos de resistência se disseminem rapidamente na população, preservando a vida útil da tecnologia biotecnológica. Pelo contrário, se o custo for baixo ou inexistente, os resistentes competem de igual para igual com os suscetíveis mesmo no refúgio, acelerando a perda de eficácia da proteína Bt (Hackett & Bonsall, 2016).

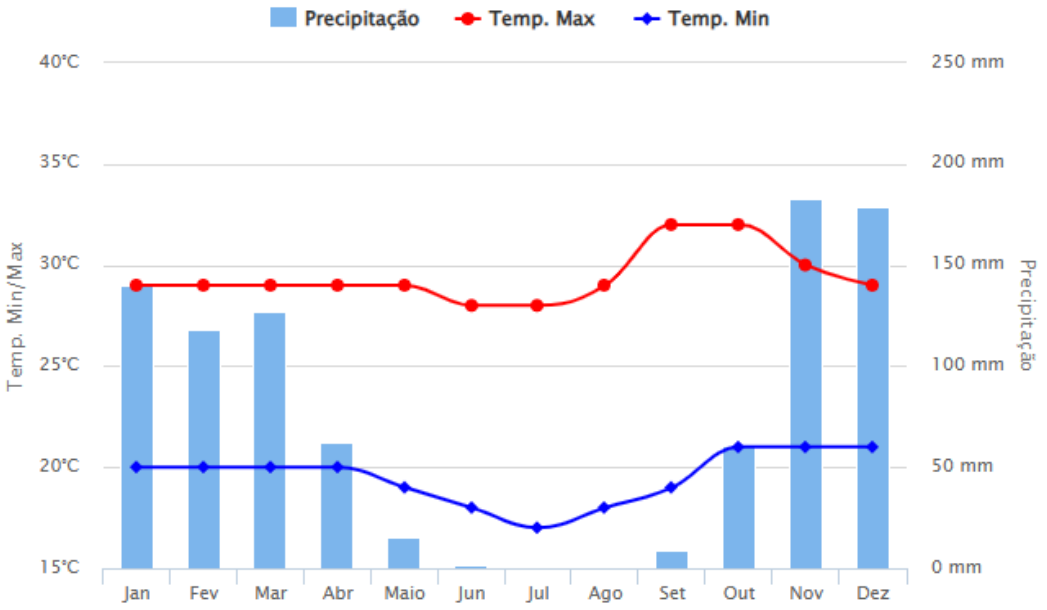
No caso do cultivar transgênico, o custo adaptativo relaciona-se também à própria eficácia e longevidade da tecnologia. Nesse sentido, compreender e quantificar os custos adaptativos dos insetos é essencial para o manejo sustentável dos cultivares Bt, definindo, por exemplo o tamanho e a forma dos refúgios, a rotação de plantas ou a introdução de genes múltiplos (piramidagem) nas plantas transgênicas (Gould, 1998; Züst & Agrawal, 2017).

Embora o uso de cultivares Bt seja uma ferramenta poderosa, seu sucesso de longo tempo depende justamente de explorar os custos adaptativos dos insetos para retardar a evolução da resistência. Essa dinâmica evidencia que a evolução adaptativa não é “gratuita”: resistência pode acarretar penalidades que, se bem aproveitadas no manejo, aumentam a sustentabilidade da tecnologia.

3 METODOLOGIA

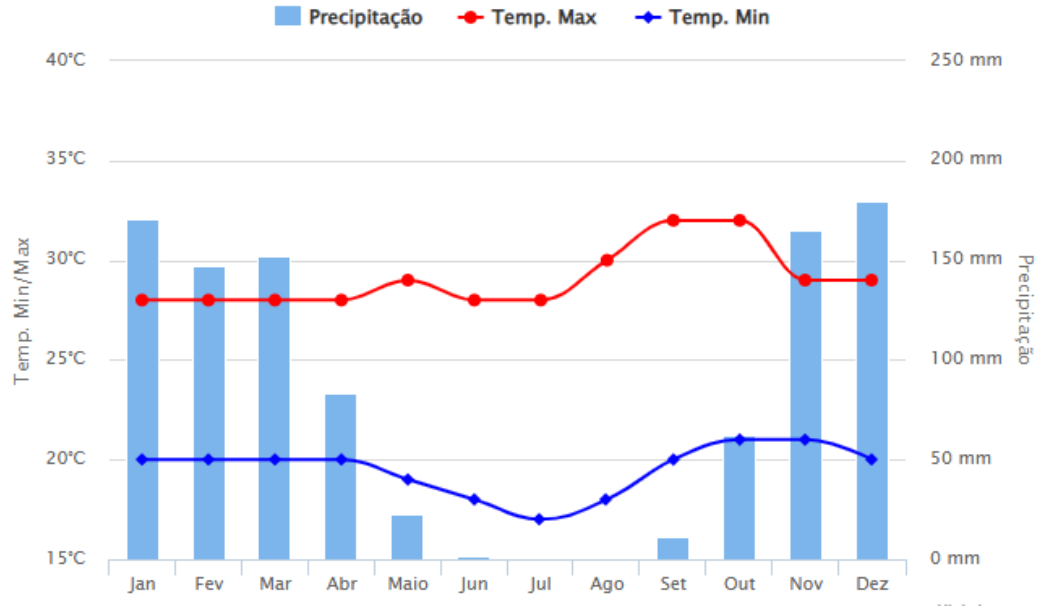
Os bioensaios foram conduzidos em Correntina e Luís Eduardo Magalhães, Bahia, com altitudes médias de 623 e 720 m, respectivamente. Ambas as regiões apresentam clima tropical Aw, com estação seca bem definida e período chuvoso entre outubro e abril. Os solos são predominantemente Latossolos (vermelhos, vermelho-amarelos e amarelos), com ocorrência de Neossolos Quartzarênicos em ambos os municípios e Cambissolos em Correntina. Os dados climáticos de temperatura e precipitação das cidades em que foram conduzidos os bioensaios estão dispostos na Figura 1 (Correntina – BA) e Figura 2 (Luís Eduardo Magalhães – BA).

Figura 1. Precipitação e temperatura na cidade de Correntina – BA.



Fonte: Climatempo

Figura 2. Precipitação e temperatura na cidade de Luís Eduardo Magalhães – BA



Fonte: Climatempo

A população de referência, *S. frugiperda*, foi recebida da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. A população comercial de insetos utilizadas nos bioensaios foram coletados em área comercial de algodão, *Glossypium hirsutum* L., no município de Luís Eduardo Magalhães na safra de 2023/24. A coleta das lagartas de *S. frugiperda* (~ 200 lagartas) foi realizada em área de cultivo de algodão com a tecnologia Widestrike® 3, posteriormente foram colocadas em recipientes de criação

de 39 cm³ fechados na extremidade com chumaço de algodão hidrófobo, com aproximadamente 7 cm³ de dieta artificial.

Em laboratório as lagartas, a alimentação das lagartas foi realizada por meio de dieta artificial e para as adultas, solução de mel a 10% (w v^{-1}) segundo a metodologia descrita por Greene, Leppla & Dickerson, *et al.* (1976), mantidas sob condições controladas (Temperatura: 25 ± 2°C; Umidade Relativa: 70 ± 10%, e fotoperíodo de (12L: 12D h).

Os cultivares de algodão utilizados foram FM 944 GL sem a expressão da proteína 18 resistente e FM 985 GLTP a qual possui a expressão da proteína VIP3Aa19, ambos foram cultivados na casa de vegetação. As plantas foram cultivadas com espaçamento entre sementes de 8 cm, as entrelinhas com 70x70 cm, com o total de seis linhas de plantio com extensão de 4 m.

As plantas foram mantidas em casa de vegetação (tela antiafídeo - 50 mesh) e irrigadas diariamente usando quantidades similares de água para evitar indução indesejada de estresse hídrico. Para a realização dos experimentos foi utilizada estruturas vegetativas e reprodutivas de plantas de algodão de acordo com (Marur; Ruano, 2004), sendo entre folhas de V4 e V6 e botões florais B2 a B4.

Os experimentos utilizaram folhas e botões florais em delineamento inteiramente ao acaso, com dois tratamentos e sete repetições de cinco lagartas cada. As estruturas, coletadas da região apical das plantas, foram tratadas em solução de hipoclorito de sódio (0,075%) por 30 segundos, lavadas e secas. Em seguida, secções foliares (4 × 5 cm) foram acondicionadas em recipientes com papel-filtro umedecido. Em cada recipiente foram inoculadas cinco lagartas recém-eclodidas de *S. frugiperda* (até 24 h de idade), sendo as folhas substituídas em dias alternados para garantir alimento durante todo o experimento.

Para o estudo parâmetros biológicos, foi avaliado o período larval observando a duração, a sobrevivência e a viabilidade, das lagartas, as avaliações foram feitas nos períodos de 24, 72h, 120 e 168h após a instalação do experimento em laboratório.

Os dados foram submetidos aos testes de Kolmogorov-Smirnov e Levene para verificar normalidade e homogeneidade das variâncias. Em seguida, realizou-se análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($P<0,05$). Os dados percentuais foram transformados em arcsen $\sqrt{(x/100)}$ antes das análises. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (versão 4.2.0) (R Core Team, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A mortalidade de *S. frugiperda* variou significativamente entre os tratamentos e o tempo de exposição (24, 72, 120 e 168 horas) das lagartas. Às 24 h após a exposição, a mortalidade foi baixa em

todos os tratamentos, com valores variando de 1% nas folhas de algodão convencional e Bt a 8% nos botões florais de algodão Bt. Às 72 h, a mortalidade aumentou substancialmente nas plantas Bt, atingindo 78% nas folhas e 61% nos botões florais, enquanto o algodão convencional apresentou apenas 9% e 50%, respectivamente.

Após 120 e 168 h, a mortalidade nas plantas Bt foi próxima de 100%, indicando alta eficiência do algodão Bt no controle da praga, enquanto o algodão convencional manteve mortalidades inferiores a 16%. Os valores de P e F confirmam diferenças significativas entre tratamentos ao longo do tempo ($P < 0,05$; $F = 0,0001$) conforme observado na Tabela 1.

Tabela 1. Mortalidade (±EPM) de lagartas de Spodoptera frugiperda coletadas em Correntina- BA em algodão Bt e convencional Luís Eduardo Magalhães – Bahia, 2025.

Tratamentos	% Mortalidade (horas)			
	24	72	120	168
Folha Algodão conv.	1,00 ± 1,00 b	9,00 ± 2,70 a	12,00 ± 3,05 a	15,00 ± 3,27 a
Botão Floral Algodão conv.	5,00 ± 2,14 ab	50,00 ± 0,00 b	16,00 ± 3,33 b	0,00 ± 0,00 a
Folha Algodão Bt	1,00 ± 1,00 b	78,00 ± 3,82 b	99,00 ± 1,00 c	100,00 ± 0,00 b
Botão Floral Algodão Bt	8,00 ± 2,61 a	61,00 ± 3,85 c	80,00 ± 4,28 c	99,00 ± 1,01 c
F	3,45*	93,10**	197,40**	976,24**
P	0,0178	0,0001	0,0001	0,0001

EPM – Erro Padrão da Média. * Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.
Fonte: Elaborada pelos autores

De acordo com os resultados, a tecnologia Bt, apresenta elevada eficácia no controle da *S. frugiperda*, sobretudo após 72 horas de exposição, ratificando estudos anteriores que registraram alta vulnerabilidade dessa espécie às proteínas inseticidas produzidas por *Bacillus thuringienses* (Bt) (Holman *et al.* 2025). A presença de aleloquímicos no algodoeiro, como aldeídos terpenoides produzidos em glândulas epidérmicas e o gossypol, cuja distribuição desigual entre os órgãos das plantas resulta em diferentes gruas de proteção para cada tecido, constitui um dos principais mecanismos de defesa da planta contra herbivoria (Gadelha *et al.* 2014; Masood *et al*, 2022).

Essa variação espacial afeta diretamente o desempenho de lagartas, uma vez que a ingestão de tecidos com maior teor de gossypol provoca redução na digestibilidade, diminuição do ganho de peso e aumento da mortalidade em espécies como *Helicoverpa zea* e *Helicoverpa armigera* (Krempl *et al*., 2016), corroborando com os resultados obtidos nesse estudo (Tabela 1). Estudos também mostram que a produção de terpenoides pode alterar em resposta a estímulos bióticos e varia entre genótipos de algodão, influenciando o nível de resistência conferido pela planta (Tian *et al.*, 2016). Além disso, pesquisas recentes demonstram que é possível modular a distribuição do gossypol via engenharia genética, reduzindo a concentração nas sementes e mantendo-o em tecidos vegetativos sem comprometer a defesa química (Gao *et al*., 2022).

A mortalidade próxima de 100% de *Spodoptera frugiperda* em plantas transgênicas que expressam a proteína Vip3Aa20 confirma a elevada eficácia dessa toxina contra populações de campo (Moscardini *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2024). Esse resultado contrasta com a redução de eficiência já relatada para as proteínas Cry1F, Cry1A.105 e Cry2Ab2 no Brasil (Bernardi *et al*., 2015; Prasanna *et al.*„ 2022). A ausência de sobrevivência significativa da população avaliada, possivelmente oriunda da região de Luís Eduardo Magalhães (BA), indica que a frequência de alelos de resistência à Vip3Aa20 ainda permanece baixa nessa importante região produtora.

Os altos níveis de mortalidade em algodão Bt nesse experimento indicam que, no momento, a tecnologia continua eficaz no controle de *S. frugiperda* na região de Luís Eduardo Magalhães – BA. No entanto, deve-se destacar que casos de resistência já foram documentados para essa espécie no Brasil, sobretudo contra a proteína Cry1F (Farias *et al*. 2014) e contra Cry1Ab (Omoto *et al*. 2016). Devido a essa alta suscetibilidade, não foi possível observar sobreviventes suficientes para estimar parâmetros biológicos em dieta não-Bt, inviabilizando a caracterização de eventual custo adaptativo.

Sorgatto, Bernardi e Omoto (2015) observaram mortalidade superior a 80% de neonatos de *Spodoptera frugiperda* em folhas de algodão Bt (Cry1Ac/Cry2Ab2 e Cry1Ac/Cry1F) em comparação ao algodão não Bt. A elevada mortalidade em folhas e botões florais pode ser atribuída à ação das proteínas Cry e Vip3Aa, que promovem danos ao epitélio intestinal das lagartas (Bravo *et al*., 2007). Embora não tenham sido encontrados estudos brasileiros sobre a combinação Vip3Aa + Cry em algodão para *S. frugiperda*, Chen *et al.* (2017) demonstraram que essa pirâmide de toxinas amplia o espectro de controle e aumenta a eficácia do manejo.

No algodão convencional, a baixa mortalidade reflete a ausência de proteínas Bt inseticidas, contribuindo para a sobrevivência e o desenvolvimento das lagartas. Por outro lado, no algodão Bt, as diferenças na mortalidade observadas entre folhas e botões florais podem estar associadas à variação espacial da concentração ou da expressão da proteína Bt nos diferentes tecidos do algodoeiro, conforme relatado por Adamczyk e Gore (2004).

Os altos níveis de mortalidade em algodão Bt nesse experimento indicam que, no momento, a tecnologia continua eficaz no controle de *S. frugiperda* na região de Luís Eduardo Magalhães – BA. No entanto, deve-se destacar que casos de resistência já foram documentados para essa espécie no Brasil, sobretudo contra a proteína Cry1F (Farias *et al*. 2014) e contra Cry1Ab (Omoto *et al*. 2016).

Ao considerar a durabilidade desta eficácia, torna-se fundamental abordar o conceito de custo adaptativo associado à resistência a Bt. Em termos evolutivos, se indivíduos de *S. frugiperda* desenvolverem alelos de resistência que lhes permitam sobreviver na planta Bt, a existência ou

magnitude de um *cost* adaptativo em ambientes não Bt (e.g., planta convencional ou refúgio) pode determinar a rapidez com que a resistência se espalha (Gassmann, Carrière & Tabashnik 2009).

Em relação da *S. frugiperda* no Brasil, estudos avaliaram se há ou não custos adaptativos relevantes para resistência à proteína Cry1F. Santos-Amaya *et al*. (2017) identificou que, em duas linhagens brasileiras selecionadas para resistência a Cry1F; não observaram custos de aptidão significativos no laboratório. Horikoshi *et al*. (2015) concluíram que não foram observados "custos de aptidão relevantes" em uma linhagem *near-isogenic* resistente a Cry1F, em condição de dieta artificial.

Comparando com a literatura, os níveis de mortalidade observados neste estudo indicam que a tecnologia Bt permanece eficaz no controle da *S, frugiperda* na região de Luiz Eduardo Magalhães (BA) (Tabela 1). Todavia, caso a resistência evolua e não for acompanhada por custos adadptativos significativos, os indivíduos resistentes poderiam recuperar a aptidão semelhante aos suscetíveis em ambientes não Bt ou em tecidos com menor expressão da toxina, o que facilitaria a disseminação da resistência.Por exemplo, a menor mortalidade no botão floral de algodão Bt (61% aos 72 h) em relação às folhas (78%) sugere uma possível variação na eficácia da proteína entre os tecidos, podendo favorecer a sobrevivência de alguns indivíduos.

Em termos de manejo, isso implica que embora a tecnologia Bt tenha mostrado excelente desempenho imediato, a durabilidade desse desempenho depende de três fatores interligados: (1) minimizar o número de sobreviventes em planta Bt (ou em tecidos de "escape"); (2) garantir que, caso surjam indivíduos resistentes, esses apresentem custos adaptativos que retardem a propagação; (3) implementar estratégias de manejo de resistência, tais como refúgios, rotação de modos de ação, monitoramento de danos, para reforçar a pressão sobre os suscetíveis e reduzir a vantagem dos resistentes (Tabashnik & Carrière 2017).

Contudo, a eficácia atual reforça a necessidade urgente da manutenção de áreas de refúgio estruturado para retardar a evolução da resistência, visto que a Vip3Aa representa, atualmente, uma das últimas tecnologias Bt altamente eficazes disponíveis para a cultura do algodão no país.

5 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que o algodão Bt promoveu mortalidade significativamente superior de *Spodoptera frugiperda* em relação ao algodão convencional, atingindo valores próximos de 100% após 120 e 168 horas. Esses resultados confirmam a elevada eficácia da tecnologia Bt nas condições de Luís Eduardo Magalhães (BA). Entretanto, a manutenção dessa eficácia depende da adoção de estratégias de manejo da resistência, uma vez que a ausência de custos adaptativos pode favorecer a persistência e a disseminação de indivíduos resistentes.

Dessa forma, recomenda-se a integração do algodão Bt com práticas de Manejo Integrado de Pragas (MIP), incluindo o monitoramento periódico da lavoura, o uso de controle biológico, a aplicação de inseticidas conforme as doses recomendadas e a priorização de cultivares com tecnologia Bt Vip3Aa. A adoção dessas estratégias é fundamental para preservar a eficácia da tecnologia e minimizar os danos causados por *S. frugiperda* à cultura do algodão.

REFERÊNCIAS

ADAMCZYK, J. J.; GORE, J. Development of bollworms, Helicoverpa zea, on two commercial Bollgard® that differ in overall Cry1Ac levels. Journal of Insect Science, v. 4, n. 32, 2004.

BAYER. A Sustentabilidade do Algodão Bt. 2022. Disponível em: https://www.agro.bayer.com.br/conteudos/a-sustentabilidade-do-algodao-bt. Acesso em: 15 out. 2025.

BERNARDI, D. *et al.* Cross-Resistance between Cry1 Proteins in Fall Armyworm (Spodoptera frugiperda) May Affect the Durability of Current Pyramided Bt Maize Hybrids in Brazil. PLOS ONE, v. 10, n. 10, e0140130, 2015.

BERNARDI, O. *et al.* Selection and characterization of Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae) resistant to the Bt protein Cry1F in Brazil. Pest Management Science, v. 71, n. 8, p. 1058–1066, 2015.

BRAVO, A.; GILL, S. S.; SOBERÓN, M. Mode of action of Bacillus thuringiensis Cry and Cyt toxins and their potential for insect control. Toxicon, v. 49, n. 4, p. 423-435, 2007.

CHEN, W. *et al.* Transgenic cotton co-expressing chimeric Vip3AcAa and Cry1Ac confers effective protection against Cry1Ac-resistant cotton bollworm. Transgenic Research, 2017.

CTNBIO - COMISSÃO TÉCNICA NACIONAL DE BIOSSEGURANÇA. Parecer Técnico nº 1.179/2018. 2018. Disponível em: https://www.ctnbio.gov.br. Acesso em: 26 maio 2023.

CZEPAK, C. *et al.* Primeiro registro de ocorrência de Spodoptera frugiperda (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) resistente à proteína Cry1F no Brasil. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v. 43, n. 1, p. 110–113, 2013.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. World Cotton Outlook 2023. Roma: FAO, 2023.

FARIAS, J. R. *et al.* Frequency of Cry1F resistance alleles in Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae) populations from Brazil. Pest Management Science, v. 70, n. 5, p. 829–834, 2014.

GADELHA, I. C. N. *et al.* Gossypol Toxicity from Cottonseed Products. The Scientific World Journal, ID 231635, 2014.

GAO, W. *et al.* Gossypol: A review on its biological activities, pharmacological effects and toxicity. Food Chemistry: Molecular Sciences, v. 4, 100130, 2022.

GASSMANN, A. J.; CARRIÈRE, Y.; TABASHNIK, B. E. Fitness Costs of Insect Resistance to Bacillus thuringiensis. Annual Review of Entomology, v. 54, p. 147-163, 2009.

GOULD, F. Sustainability of transgenic insecticidal cultivars: integrating pest genetics and ecology. Annual Review of Entomology, v. 43, p. 701-726, 1998.

GREENE, G. L.; LEPPLA, N. C.; DICKERSON, W. A. Velvetbean Caterpillar: A Rearing Procedure and Artificial Medium. Journal of Economic Entomology, v. 69, n. 4, p. 487–488, 1976.

HACKETT, S. C.; BONSALL, M. B. Type of fitness cost influences the rate of evolution of resistance to transgenic Bt crops. Journal of Applied Ecology, v. 53, n. 5, p. 1391-1401, 2016.

HOLMAN, S. *et al.* Lethal and sublethal effects of cotton expressing single and pyramided proteins of Bacillus thuringiensis (Bt) on Helicoverpa armigera, Spodoptera litura, and Spodoptera frugiperda. Journal of Economic Entomology, toaf089, 2025.

HORIKOSHI, R. J. *et al.* Mapping and characterization of a major locus for Cry1F resistance in a Brazilian population of Spodoptera frugiperda. Theoretical and Applied Genetics, v. 135, p. 1-10, 2022.

ICAC – INTERNATIONAL COTTON ADVISORY COMMITTEE. Sustainable Cotton Production: Challenges and Opportunities. Washington, D.C.: ICAC, 2020.

ISAAA. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA): global status of commercialized biotech/GM. Cotton. 2022. Disponível em: https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/55/default.asp. Acesso em: 26 maio 2023.

KREMPL, C. *et al.* Gossypol toxicity and detoxification in Helicoverpa armigera and Heliothis virescens. Insect Biochemistry and Molecular Biology, v. 78, p. 69-77, 2016.

MARUR, C. J.; RUANO, O. Escala do algodão: um método para determinação de estádios de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo. Piracicaba: Potafós, 2004.

MASOOD, J. *et al.* An overview of cotton gland development and its transcriptional regulation. International Journal of Molecular Sciences, v. 23, n. 9, p. 4892, 2022.

MONTEZANO, D.G, *et al.* Host plants of Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. African Entomology, 26(2):286–300, 2018.

MOSCARDINI, V. F. *et al.* Efficacy of Bacillus thuringiensis (Bt) maize expressing Cry1F, Cry1A.105, Cry2Ab2 and Vip3Aa20 proteins to manage the fall armyworm in Brazil. Crop Protection, v. 137, 105269, 2020.

MOSCARDINI, V. F. *et al.* Geographical distribution of Vip3Aa20 resistance allele frequencies in Spodoptera frugiperda populations in Brazil. Pest Management Science, v. 75, n. 12, p. 3213-3220, 2019.

OMOTO, C. *et al.* Field-evolved resistance to Cry1Ab maize by Spodoptera frugiperda in Brazil. Pest Management Science, v. 72, n. 4, p. 772–779, 2016.

PRASANNA, B. M. *et al.* Host plant resistance for fall armyworm management in maize: relevance, status and prospects in Africa and Asia. Theoretical and Applied Genetics, v. 135, n. 11, p. 3897–3916, 2022.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Viena, Áustria: R Foundation for Statistical Computing, 2022.

REVISTA CULTIVAR. Produção de algodão cresce no Brasil, diz USDA. 2024. Disponível em: https://revistacultivar.com. Acesso em: 16 out. 2025.

REVISTA CULTIVAR. Quebra de tecnologia no milho preocupa produtores de MT. 2025. Disponível em: https://revistacultivar.com.br/noticias/quebra-de-tecnologia-no-milho-preocupa-produtores-de-mt. Acesso em: 15 out. 2025.

SANTOS-AMAYA, O. F. *et al.* Fitness Costs and Stability of Cry1Fa Resistance in Brazilian Populations of Spodoptera frugiperda. Pest Management Science, v. 73, p. 35-43, 2017.

SANTOS-AMAYA, O. F. *et al.* Genetic basis of Cry1F resistance in two Brazilian populations of fall armyworm, Spodoptera frugiperda. Crop Protection, v. 81, p. 154-162, 2016.

SANTOS-AMAYA, O. F. *et al.* Strong fitness costs of fall armyworm resistance to dual-gene Bt maize are magnified on less-suitable host-crop cultivars. Agronomy, v. 12, n. 3, p. 682, 2022.

SENA, J. A. D.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, C. S.; FERRÉ, J. Interaction of Bacillus thuringiensis Cry1 and Vip3A proteins with Spodoptera frugiperda midgut binding sites. Applied and Environmental Microbiology, v. 75, n. 7, p. 2236-2237, 2009.

SILVA, A. F. T. *et al.* Susceptibility of Fall Armyworm Field Populations to Vip3Aa/Cry Bt Maize in a Tropical Agricultural Region. Agronomy, v. 14, n. 3, art. 451, 2024.

SMITH, J. E. The natural history of the rarer lepidopterous insects of Georgia: including their systematic characters, the particulars of their several metamorphoses, and the plants on which they feed. Londres: T. Bensley, 1797.

TABASHNIK, B. E.; CARRIÈRE, Y. Surge in insect resistance to transgenic crops and prospects for sustainability. Nature Biotechnology, v. 35, n. 10, p. 926–935, 2017.

TAY, W. T. *et al.* Spodoptera frugiperda: Ecology, evolution, and management options of an invasive species. Annual Review of Entomology, v. 68, p. 299–320, 2023.

TIAN, X. *et al.* Gossypol: phytoalexin of cotton. Science China Life Sciences, v. 59, n. 2, p. 122-129, 2016.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Cotton and Wool Outlook 2023–2024 Report. Washington, D.C.: USDA, 2024.

WU, K. M. *et al.* Suppression of Cotton Bollworm in Multiple Crops in China in Areas with Bt Toxin-Containing Cotton. Science, v. 321, n. 5896, p. 1676-1678, 2008.

YU, H.; WU, K.; JIANG, Y. Resistance evolution of Spodoptera frugiperda to Bt crops: mechanisms, monitoring, and management strategies. Insects, v. 12, n. 5, p. 468, 2021.

ZHANG, Z. *et al.* Environmental impacts of cotton and opportunities for improvement. Nature Reviews Earth & Environment, v. 4, p. 703-715, 2023.

ZÜST, T.; AGRAWAL, A. A. Trade-offs between plant growth and defense against insect herbivory: an emerging mechanistic synthesis. Annual Review of Plant Biology, v. 68, p. 513-534, 2017.