**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Impacto econômico da resistência de pragas à tecnologia *Bt* no Brasil: um estudo de caso para milho em Rio Verde (GO)

Heide Mariane Sorroche Almeida

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração Economia Aplicada

**Piracicaba
2018**

Heide Mariane Sorroche Almeida
Engenheira Agrônoma

**Impacto econômico da resistência de pragas à tecnologia *Bt* no Brasil: um estudo de caso
para milho em Rio Verde (GO)**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:

Prof.^a Dr.^a **SILVIA HELENA GALVÃO DE MIRANDA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração Economia Aplicada

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Almeida, Heide Mariane Sorroche

Impacto econômico da resistência de pragas à tecnologia *Bt* no Brasil: um estudo de caso para milho em Rio Verde (GO) / Heide Mariane Sorroche Almeida. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2018.

147 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Resistência 2. Tecnologia *Bt* 3. Monte Carlo 4. Viabilidade econômica I.
Título

Dedico aos meus pais, Etel Roberto Pantaleão Almeida e Suzie Stela Sorroche Almeida e irmã, Helen Viviane Sorroche Almeida, os maiores amores da minha vida a quem dedico todas as minhas vitórias, por todo apoio e amor.

A minha querida orientadora Professora Doutora Silvia Helena Galvão de Miranda que sempre esteve a disposição para me orientar no que fosse preciso.

A todos os professores do Mestrado que deram embasamento teórico para que este trabalho pudesse ser concluído.

Aos Professores Doutores Celso Omoto, Mauro Osaki, Andréia Adami e Geraldo Santana de Barros que contribuíram diretamente com a conclusão desta Dissertação.

AGRADECIMENTOS

À minha família, meus pais e minha irmã, por todo incentivo e apoio durante meus longos anos de estudo e principalmente pelo carinho, amor e compreensão.

À orientadora e amiga, Professora Doutora Silvia Helena Galvão de Miranda, pela competência e respeito com que conduziu este trabalho, das ideias iniciais até a sua síntese.

Aos Professores Doutores Celso Omoto, Mauro Osaki, Geraldo Santana de Barros, pelas valiosas contribuições no Exame de Qualificação.

À pesquisadora Doutora Andréia Adami que acompanhou a trajetória desse trabalho com valiosas contribuições, ensinamentos e dicas fundamentais para as conclusões deste trabalho, pela atenção e paciência.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVO	13
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1 DEFINIÇÃO DE RESISTÊNCIA	15
3.2 IMPACTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS CAUSADOS PELA RESISTÊNCIA DE PRAGAS.....	18
3.2.1 Impactos econômicos da resistência de pragas à cultura <i>Bt</i> para o produtor rural	20
3.3 MANEJO DA RESISTÊNCIA DE PRAGAS A PLANTAS <i>Bt</i>	23
3.3.1 Estratégia de alta dose e refúgio	24
3.3.1.1 Recomendações para a semeadura da área de refúgio	27
3.3.2 Estratégia da pirâmide de genes.....	29
3.4 ADOÇÃO DE PLANTAS <i>Bt</i> NO BRASIL	30
3.5 STATUS E CASOS REGISTRADOS DE RESISTÊNCIA DE PRAGAS-ALVO A PLANTAS <i>Bt</i>	33
3.5.1 Potencial de <i>Spodoptera frugiperda</i> para evolução de resistência a proteínas de <i>Bt</i>	35
3.6 FREQUENCIA CRÍTICA DO ALELO DE RESISTÊNCIA NA ÁREA DA CULTURA <i>Bt</i>	38
4 METODOLOGIA	47
4.1 REFERENCIAL METODOLÓGICO	47
4.1.1 Modelos de Otimização	49
4.1.2 Método de Análise de Viabilidade Econômica	53
4.2 METODOLOGIA PROPOSTA E DADOS	56
4.2.1 Análise de Viabilidade Econômica	56
4.2.1.1 Valor Presente Líquido (VPL).....	57
4.2.1.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)	59
4.2.1.3 Coeficiente benefício-custo (B/C).....	61
4.2.1.4 Método de Monte Carlo (MMC) para análise de risco	62
4.2.1.5 Especificação dos dados, pressuposições e bases de cálculos	64
4.2.1.6 Cenários adotados e base de comparação	75
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
5.1 AVALIAÇÃO GERAL DAS SAFRAS DE MILHO SAFRINHA EM RIO VERDE (GO)	79
5.2 AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DO MILHO SEGUNDA SAFRA EM RIO VERDE (GO).....	84
5.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE MILHO <i>Bt</i>	95
5.4 ANÁLISE DE RISCO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE PRODUÇÃO DE MILHO <i>Bt</i> EM FUNÇÃO DA EVOLUÇÃO DA FREQUÊNCIA DE LAGARTAS <i>SPODOPTERA FRUGIPERDA</i> RESISTENTES	98
5.5 ANÁLISE ESTATICA DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO MILHO <i>Bt</i> E CONVENCIONAL.....	106
5.6 ANÁLISE DE RISCO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE PRODUÇÃO DE MILHO <i>Bt</i> E CONVENCIONAL	110
6 CONCLUSÕES	119
REFERÊNCIAS	123
ANEXOS	139

RESUMO

Impacto econômico da resistência de pragas à tecnologia *Bt* no Brasil: um estudo de caso para milho em Rio Verde (GO)

O objetivo deste estudo é identificar e analisar os impactos que o desenvolvimento da resistência de pragas à tecnologia do milho *Bt* tem sobre a cultura do milho para o agricultor, como forma de incentivar, pelo aspecto econômico, o uso de práticas adequadas à gestão da resistência, de modo a postergar sua evolução. A justificativa da escolha deste tema está não só no grande impacto econômico e social da resistência de pragas às culturas *Bt* no Brasil e no mundo, capaz de causar sérias perdas aos agricultores, mas também à indústria biotecnológica e aos próprios consumidores. Ademais, embora a eficácia das plantas *Bt* no controle de pragas agrícolas seja comprovada e seu uso seja frequente no Brasil, há necessidade de difusão sobre a importância da adequação de medidas de manejo de resistência (MRI) pelo agricultor. Medidas como a adoção das áreas de refúgio dentro dos programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP), visando, pelo menos, retardar a evolução da resistência das pragas aos cultivos *Bt*, garantindo que essa tecnologia permaneça viável por mais tempo. A hipótese deste trabalho é que a evolução da resistência de pragas ao cultivo *Bt* reduz a probabilidade de obtenção de lucro pelo agricultor. Isto porque, com a exigência de maior número de aplicações inseticidas para complementar a ineficiência de controle do cultivo *Bt*, há elevação dos custos com pulverizações, aos quais se somam os altos custos da semente *Bt*, tornando os custos de produção superiores à receita bruta obtida pelo produtor. Assim, com a finalidade de realizar alguma quantificação de impactos, conduz-se como estudo de caso, a análise de viabilidade econômica da produção de milho *Bt*, sob condições de evolução da resistência de *Spodoptera frugiperda* (lagarta do cartucho) ao milho *Bt*. Para tanto, desenvolve-se um método para a análise de risco, avaliando dois índices econômicos, o VPL (Valor Presente Líquido) e a relação B/C (Benefício Custo), e utilizando o método de Monte Carlo para gerar simulações das variáveis de risco, preço e produtividade do milho. Foram analisados dados do fluxo de caixa da produção do milho *Bt* e convencional, coletados da base do Cepea, obtidos por meio de painéis, informações sobre propriedades modais de Rio Verde (GO), relativas ao período de 2009/10 a 2015/16. Adotou-se o conceito de Custo Operacional Efetivo na análise. Os resultados indicaram que, de fato, a resistência possui um impacto negativo sobre o lucro do produtor rural no médio e longo prazo, confirmando a hipótese do estudo. Evidenciou-se que a produção de milho *Bt*, na ausência da evolução da resistência de pragas é o cenário com maior viabilidade econômica, devido ao menor risco de um VPL negativo na atividade produtiva e de uma relação B/C menor que 1. Todavia quando é inevitável conter a evolução da resistência, e à medida que a frequência de pragas resistentes ao cultivo *Bt* se eleva, os riscos de a produção do milho transgênico se tornar inviável economicamente são maiores, diante de uma maior probabilidade de ocorrência de VPL negativo e de uma relação B/C inferior a um.

Palavras-chave: Resistência; Tecnologia *Bt*; Monte Carlo; Viabilidade econômica

ABSTRACT

Economic impact of pest resistance to Bt technology in Brazil: a case study for corn in Rio Verde (GO)

The purpose of this study is to identify and analyze the impacts that the development of pest resistance to the *Bt* corn technology has on the corn crop for the farmer, as a way to encourage the use of appropriate practices for the management of resistance, so that it can delay its evolution. The justification for choosing this subject is not only in the great economic and social impact of pest resistance to *Bt* crops in Brazil and in the world, which can cause serious losses to farmers, the biotechnology industry and consumers themselves. Moreover, although the effectiveness of *Bt* plants in the control of agricultural pests is proven and their use is frequent in Brazil, it is necessary to disseminate the importance of the adaptation of measures of resistance management (IRM) by the farmer. Measures such as the adoption of the areas of shelter within the Integrated Pest Management (IPM) programs, objectifying to at least delay the evolution of pest resistance to *Bt* crops, ensuring that this technology remains accessible longer. The hypothesis of the present work is that the evolution of pest resistance to *Bt* crop decreases the probability of obtaining profit to the farmer. This is because with the requirement of a greater number of insecticide applications to add to the control inefficiency of the *Bt* crop, there is an increase in spraying costs which adds up to the high *Bt* seed costs, making production costs higher than the relevant income obtained by the producer. Thus, in order to perform some quantification of the impacts, the economic viability analysis of the *Bt* maize production is carried out under conditions of evolution of the resistance of *Spodoptera frugiperda* to *Bt* corn. To do so, a method for risk observance was developed evaluating two economic indices, the NPV and the B / C ratio and using the Monte Carlo method to generate simulations of corn risk, price and productivity variables. *Bt* and conventional maize production cash flow data were collected from the Cepea base, acquired through panels, information on modal properties of Rio Verde (GO). The concept of Effective Operational Cost was adhered to in the analysis. The results indicated that, in fact, the resistance has a negative impact on the rural producers' profit in the medium and long term, confirming the hypothesis of the study. It was evidenced that the production of *Bt* corn, without occurrence of the evolution of pest resistance is the circumstance that presents greater economic viability, due to the lower risk of a negative NPV in the productive activity and a B / C ratio lower than 1. However, when it is inevitable to contain the evolution of resistance and as it increases the frequency of pests resistant to *Bt* cultivation, there will be a greater risk that the production of transgenic maize will become economically unviable, due to a higher probability of negative NPV occurrence and of a B / C ratio of less than one.

Keywords: Resistance; *Bt* technology; Monte Carlo; Economic viability

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial, bem como o de sua renda *per capita*, pressionam pelo aumento da produção de alimentos e assim torna-se necessária a busca por tecnologias que possibilitem a evolução da produção alimentar, capaz de suprir toda essa demanda. Essas tecnologias objetivam melhorar e aumentar o potencial produtivo das culturas por meio do avanço da genética, da nutrição das plantas e também pelo combate de fatores limitantes à produção agrícola, como é o caso das pragas e doenças. Atualmente se observa muitos avanços relacionados ao desenvolvimento de variedades de plantas geneticamente modificadas, as quais constituem as tecnologias mais utilizadas para o combate destes fatores limitantes até o momento.

Neste contexto, ressalta-se a relevância das variedades de plantas resistentes que expressam proteínas inseticidas contra várias pragas de importância econômica, disponibilizadas pela evolução da engenharia genética. Atualmente, essas plantas geneticamente modificadas (GM) resistentes a insetos têm sido uma das principais táticas de manejo de insetos praga em vários sistemas de produção, constituindo uma ferramenta eficaz de controle de pragas agrícolas, passando a ser usadas em escala significativa na agricultura, na busca por maior produção alimentar. Nos dias atuais, as culturas geneticamente modificadas comercialmente disponíveis expressam genes de uma bactéria encontrada no solo, a *Bacillus thuringiensis* Berliner, que podem codificar a expressão de duas proteínas com ação inseticida: Cry ou Proteínas Inseticidas Vegetativas (VIPs), e por isso são popularmente chamadas de plantas *Bt*¹ (BERNARDI *et al.*, 2011).

¹ Cientistas identificaram no DNA da bactéria *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) os genes responsáveis pela expressão das proteínas inseticidas tóxicas para alguns insetos, principalmente das ordens *Lepidoptera* (borboletas e mariposas), *Diptera* (moscas e mosquitos), *Coleoptera* (besouros) e *Hymenoptera* (vespas, abelhas e formigas) e também para espécies de nematoides (parasitas) e os introduziram em plantas de interesse agrônomo, como a soja, o milho e o algodão. Para compreender qual a ação esperada no controle de pragas é preciso entender o modo de ação das proteínas *Bt* sobre insetos: aqui cabe ressaltar que estas são sintetizadas como protoxinas, que não possuem atividade tóxica, ou seja, a toxina só se torna ativa quando ingerida pelo inseto, porque devido às condições alcalinas (pH acima de 8) do tubo digestivo, ocorre a quebra da proteína liberando o núcleo ativo, o qual se ligará a receptores ativos específicos na parede intestinal do inseto, desencadeando o processo que se inicia pela inibição da digestão e absorção dos alimentos, provocando a ruptura das células da parede do tubo digestivo e consequente morte das lagartas. Ressalta-se que a toxina é inócua a humanos e vertebrados em geral, pois os mesmos possuem o pH intestinal ácido, onde a proteína é rapidamente degradada. Desta forma, as plantas *Bt* passaram a ser utilizadas em escala significativa na agricultura mundial e no Brasil em vista dos vários benefícios que promovem como a redução do uso de inseticidas e de combustível para o controle de pragas, diminuição das perdas causadas por pragas, além da preservação dos inimigos naturais e redução dos riscos de intoxicação.

Porém, a principal ameaça à sustentabilidade das plantas *Bt* tem sido a evolução da resistência em populações de pragas-alvo de controle (ANDOW, 2008), podendo tornar essa tecnologia ineficaz ao controle de pragas no médio e longo prazo, trazendo consequências diretas ao produtor rural, bem como para a indústria agroquímica e de engenharia genética.

De acordo com a definição de Insecticide Resistance Action Committee (IRAC), a resistência consiste em uma mudança hereditária na suscetibilidade de uma população da praga, refletindo na falha repetida de um agente de controle atingir o nível de controle esperado, quando utilizado de acordo com a recomendação para determinada praga-alvo. Em termos práticos, a resistência ocorre quando existem indivíduos praga resistentes em número suficiente para provocar dano econômico em uma determinada cultura devido a falhas no controle.

Assim, no caso de resistência às plantas *Bt*, a praga que anteriormente era controlada de forma efetiva, passa a apresentar a habilidade de sobreviver, da fase de ovo até a fase adulta, alimentando-se exclusivamente de planta *Bt*, além de produzir descendentes viáveis (Andow, 2008). O fato ocorre, pois, em uma população de pragas suscetível (não resistente) normalmente há um número mínimo de indivíduos naturalmente resistentes, que podem ser selecionados ao se cultivar intensivamente uma cultura *Bt*, desde que não haja a adoção de um correto manejo integrado de pragas (MIP). Isso se deve à expressão contínua das proteínas inseticidas nos tecidos dessas plantas, capazes de exercer elevada pressão de seleção sobre as populações das pragas alvo de controle, eliminando as suscetíveis e possibilitando a evolução das resistentes, que acabam sobrevivendo e se reproduzindo na ausência de competição das pragas suscetíveis, originando descendentes igualmente resistentes. Ao longo dos anos, com o uso intensivo das culturas *Bt* promove-se o aumento da frequência dos indivíduos resistentes na população de pragas, caso estratégias de manejo da resistência (MR) não sejam implementadas (TABASHNIK, RENSBURG, VAN e CARRIÈRE, 2009). Essas pragas resistentes podem inclusive evoluir mais rapidamente para resistência a novas proteínas *Bt*, com modo de ação similar ou semelhante via de desintoxicação.

Por esse motivo, existe uma grande preocupação em torno da evolução de resistência de pragas, pois não se pode contar com um fluxo constante de criação de novas plantas *Bt* e outros agentes para controle dos insetos resistentes, pela indústria agroquímica e de engenharia genética. Em muitos casos, observa-se que a resistência está se espalhando a uma taxa crescente, enquanto o desenvolvimento de novas tecnologias diminuiu drasticamente.

A grande apreensão com relação ao desenvolvimento de resistência de pragas se deve ao fato de que ela é capaz de causar sérias perdas e danos tanto aos agricultores, quanto à indústria agroquímica, biotecnológica e aos próprios consumidores. À indústria, a resistência

torna-se impactante, pois representa a perda precoce de uma tecnologia que custa tempo e milhões para ser desenvolvida, além de reduzir o leque de tecnologias disponíveis para o controle de uma praga, levando ao aumento do custo das poucas opções que ainda restam disponíveis, trazendo consequências diretas para o consumidor (PAPA *et al.*, 2014).

No caso do produtor, quando uma população de pragas atinge uma frequência ou número de indivíduos resistentes suficiente para provocar dano econômico em uma determinada cultura, devido a sua menor eficácia à prevenção aos danos causados pelas pragas, isso diminui a produção agrícola, exigindo que muitos agricultores passem a utilizar doses ou números de aplicações cada vez maiores de produtos químicos nas culturas. Assim, a resistência torna-se um fator de grande impacto ao produtor, pois leva a danos econômicos devido a falhas no controle, perdas de produção e aumento de custo de produção devido a necessidade de maior controle químico. Portanto, é fundamental que os produtores considerem a adoção de estratégias de manejo da resistência em suas propriedades, visto que esse conjunto de medidas tem como objetivo reduzir o risco de seleção de insetos resistentes nas populações de pragas-alvo de controle.

Neste contexto, a resistência de pragas às culturas *Bt* é considerada um problema mundial, sendo relatada por vários pesquisadores já há alguns anos, como McGaughey (1985), que reportou o primeiro caso de resistência de insetos a toxinas de *B. thuringiensis* em uma população de *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: *Pyralidae*), Simns; Stone (1991), que constatou evolução de resistência em campo em *H. virescens* e Ferré; Van Rie (2002a), que verificou resistência de *P. xylostella* em populações de campo no Sudeste da Ásia, Havaí e Sudeste dos EUA. Recentemente foram reportados os casos de resistência de *S. frugiperda* ao milho Cry1F em Porto Rico e *Busseola fusca* (Lepidoptera: Noctuidae) em milho Cry1Ab na África do Sul. O caso de evolução de resistência de *S. frugiperda* ao milho Cry1F ocorreu apenas quatro anos após a liberação comercial desse evento, tornando esse o caso mais rápido de evolução de resistência a campo para uma cultura *Bt* (STORER *et al.*, 2010).

Atualmente, com a grande adoção de culturas *Bt*, em especial a do milho no Brasil, algumas espécies-praga como a *Spodoptera frugiperda*, tornam-se alvos de preocupação pela sua possibilidade de desenvolvimento de resistência à essa tecnologia, exigindo que o manejo da resistência seja extremamente efetivo para minimizar a chance de seleção de pragas resistentes.

Portanto, o presente trabalho pretende identificar e avaliar os impactos negativos provocados pelo desenvolvimento de resistência de pragas à tecnologia *Bt*, principalmente para

o produtor rural, por meio de um estudo de caso aplicado para a região de Rio Verde (GO), onde se faz uma análise da viabilidade econômica da produção de milho *Bt* nessa região, em função da evolução da resistência de uma praga específica, a lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*), para um período de 10 anos. Utilizando o Método de Monte Carlo para a análise de risco dos indicadores econômicos Valor presente líquido (VPL) e Coeficiente de benefício custo (B/C). A hipótese que se deseja confirmar é que a resistência de pragas é capaz de causar danos econômicos ao produtor rural, pois conforme aumenta a evolução da resistência de pragas em uma cultura, aumentam os riscos de obtenção de redução dos lucros do produtor rural com sua atividade, tornando-a inviável economicamente, devido principalmente ao aumento no custo de produção, decorrente da necessidade de aplicações mais intensivas de defensivos químicos, como forma de compensar a menor eficiência da cultura *Bt* no controle dessas pragas.

A importância de realizar a identificação e quantificação dos prejuízos causados pela resistência de pragas justifica-se, pois ao mensurá-los fica mais fácil argumentar com o produtor rural, a favor do Manejo Integrado de Pragas (MIP) e da adoção de práticas sustentáveis relacionadas à gestão da resistência. Além de sensibilizar os demais agentes da cadeia de produção, que também possuem ações com importância fundamental para atenuar os problemas originados da resistência. A relevância deste estudo reside no fato de que, não adianta apenas informar o produtor sobre a necessidade de se adequarem as práticas sustentáveis contidas no MIP, na tentativa de impossibilitar o desenvolvimento da resistência de pragas, mas também se faz necessário provar com dados, revelando os resultados mais amplos, a médio e longo prazo do grande impacto negativo da resistência sobre a economia do produtor rural.

Conclui-se que a importância deste estudo está na sua contribuição para o auxílio ao produtor rural nas suas tomadas de decisão referentes as ações de gestão da resistência e extensão do planejamento das políticas estratégicas, evidenciando a fundamental necessidade de adequar a produção agrícola aos princípios do Manejo Integrado de Pragas.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo evidenciar a importância econômica da resistência das pragas à tecnologia *Bt*. Mais especificamente, identificar e analisar os impactos econômicos que o desenvolvimento da resistência de pragas à tecnologia do milho *Bt* tem sobre a cultura do milho para o produtor rural.

2.1 Objetivos específicos

Este trabalho pretende primeiramente identificar os impactos econômicos que a literatura aponta decorrentes da resistência de pragas à tecnologia *Bt* e a outros agentes de controle.

Para tanto, e com intuito de contextualizar o problema, são apresentados conceitos sobre a resistência, mostrando os diversos pontos de vista disponíveis na literatura. Além disto, ainda como objetivo específico de ampliar a compreensão da resistência e de seus impactos, discute-se seu status no mundo e no Brasil.

Finalmente, adota-se como estudo específico, com finalidade de realizar alguma quantificação de impactos, a avaliação dos efeitos econômicos da resistência de *Spodoptera frugiperda* (lagarta do cartucho) na cultura do milho *Bt*. Dentro deste tema, conduz-se como estudo de caso a análise da viabilidade econômica da produção de milho *Bt* sob condições de evolução da resistência da lagarta *Spodoptera frugiperda* em Rio Verde (GO).

3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo trata de alguns aspectos e conceitos de resistência das pragas² aos agentes de controle existentes na atualidade, principalmente à tecnologia *Bt*. Primeiramente faz-se necessário ressaltar as diversas definições de resistência, sob o ponto de vista toxicológico, genético e prático. Adicionalmente são identificados os impactos sociais, ambientais e econômicos causados pelo desenvolvimento da resistência de pragas, que a literatura aponta. Em seguida são apresentados alguns aspectos relacionados sobre o manejo e gestão da resistência de pragas às plantas *Bt*, além da abrangência da adoção dessa tecnologia no Brasil. Ao final relata-se sobre o status do problema da resistência de pragas alvo das plantas *Bt* no Brasil e no mundo, além dos casos mais recentes de resistência focando no estudo para milho. São tratados também alguns aspectos sobre a resistência à cultura *Bt* de uma praga de grande importância para a cultura do milho, a *Spodoptera frugiperda*, popularmente conhecida como lagarta do cartucho à essa tecnologia. Finalmente, com o objetivo de ressaltar como a evolução da resistência de pragas-alvo das plantas *Bt* impacta na economia do produtor rural, apresentam-se algumas definições econômicas de receita e custo marginal, fazendo um paralelo com uma definição de nível de dano econômico, usada na entomologia para o caso de uso de agroquímicos para o controle de pragas.

No sentido de contextualizar e delimitar as definições empregadas neste estudo, a seguir apresentam-se, brevemente, algumas definições sobre resistência de pragas e sobre sua origem, conforme tratados na literatura.

3.1 Definição de resistência

Na literatura, a resistência pode ser definida de acordo com o ponto de vista genético, toxicológico ou prático. Dentre as definições mais antigas de resistência, do ponto de vista genético, destacam-se French-Constant; Roush (1990), Crow (1957), Dobzhansky (1951), Li; Schuler; Berenbaum (2007) e Sawicki (1987). De acordo com esses autores a resistência em pragas surge devido a pressão de seleção devido ao uso de mesma tática ou agente de controle em uma cultura qualquer, marcando uma mudança na composição genética dessa população de

² De acordo com o conceito oficial estabelecido pela FAO (2006), praga é qualquer espécie, raça ou biótipo de vegetais, animais ou agentes patogênicos nocivos aos vegetais ou produtos vegetais". Portanto, o termo praga compreende animais (insetos, ácaros e nematoides) e doenças (causadas por fungos, bactérias, vírus e viróides).

pragas, podendo ainda incluir mutações que afetam o metabolismo ou as proteínas alvo dos produtos tóxicos usados para o seu controle.

Croft; Van De Baan (1988), enfocam o ponto de visto toxicológico, citando que a resistência de pragas surge devido a habilidade, que alguns organismos resistentes possuem, de tolerar doses de um agente de controle que seriam letais para a maioria dos indivíduos da espécie.

No entanto, provavelmente a definição prática seja a mais pertinente para este trabalho bem como para o manejo de um programa de controle de pragas. De acordo com Bernardi et al. (2011), Sawicki (1987), Fitt et al. (2006) e Labbe; Lenormand; Raymond (2005) do ponto de vista prático, a resistência ocorre em população de campo, quando existem indivíduos de uma população de pragas resistentes em número ou frequência suficiente para provocar dano econômico em uma determinada cultura, como resposta a uma falha no controle dessas pragas. Neste contexto, as falhas de controle ocorridas pela evolução da resistência de pragas ocorrem quando: a praga causa prejuízos econômicos detectáveis à colheita, quando a praga causa prejuízos econômicos semelhantes àqueles causados por insetos suscetíveis a uma variedade de cultura não resistente, ou quando o dano econômico é considerado inaceitável para o produtor (ANDOW, 2008).

De acordo com Bernardi et al. (2011) o processo que determina a evolução de resistência é um caso de seleção Darwiniana, pois a contínua pressão de seleção de um agente de controle causada sobre as pragas é capaz de aumentar a frequência relativa daqueles indivíduos “pré-adaptados” já existentes na população de pragas (GEORGHIOU, 1983). É importante ressaltar que, essas populações de pragas normalmente possuem uma variação genética natural na população inicial, em resposta ao agente de controle, no caso das plantas *Bt*, à(s) proteína(s) inseticida(s) expressa(s) nessas plantas. Essa variação genética na população inicial se dá devido à existência de alguns alelos que podem conferir suscetibilidade ou a outros que podem conferir resistência (TABASHNIK, 2008). Desta forma, a baixa suscetibilidade de uma espécie a determinada proteína *Bt* não caracteriza evolução de resistência, tampouco a detecção de alelos que conferem resistência sem demonstrar que houve aumento da frequência não constituem evidências de evolução de resistência. Logo, a averiguação de evolução de resistência não necessariamente implica que falhas de controle tenham ocorrido a campo.

É interessante ressaltar, neste trabalho que existe uma diferença entre a tolerância e a suscetibilidade de pragas, as quais também apresentam conceitos distintos do da resistência. De acordo com a literatura, a tolerância é uma característica inata da espécie de sobreviver a ação de um agente de controle na dose recomendada, que seria letal a outras espécies, sem ocorrência

de alterações marcantes em seu crescimento e desenvolvimento, e, portanto, não é transmitida geneticamente aos descendentes (OMOTO *et al.*, 1995). Já no caso da suscetibilidade, há alterações com efeitos marcantes no crescimento e desenvolvimento da praga, como resultado de sua incapacidade de suportar a ação de uma tática de controle (MONQUEIRO, CHRISTOFFOLETI E DIAS, 2000).

Por fim, o que irá diferenciar a suscetibilidade da resistência é que, o processo que determina a evolução de resistência é a contínua pressão de seleção, tratando-se de um caso típico de seleção Darwiniana, conforme comentado anteriormente. De acordo com a literatura, é de se esperar que em uma população de pragas, alguns poucos indivíduos sejam naturalmente resistentes. E assim, quando esses indivíduos entram em contato com o agente de controle, que pode ser um agroquímico ou uma proteína *Bt*, o mesmo atua como agente de pressão de seleção eliminando as pragas suscetíveis. A capacidade de resistir ao agente de controle constitui uma característica determinada por certos genes, que conferem as pragas que são suas portadoras, uma variação favorável, no caso de a população ser exposta a um produto tóxico. Logo, quando a praga entra em contato com o agente de controle, observa-se no início uma forte redução na população, correspondendo a morte dos indivíduos sensíveis e as pragas resistentes sobrevivem e se reproduzem sem competição das pragas suscetíveis, originando descendentes igualmente resistentes. Se a mesma tática de controle persistir, a porcentagem de sobreviventes selecionados aumenta e a suscetibilidade da população será reduzida a um ponto em que essa tática não mais fornece um nível aceitável de controle (BEATY e MARQUARDT, 1996).

Adicionalmente, é interessante dizer que a resistência de pragas pode ser causada por diferentes mecanismos, os quais foram estudados por muitos autores, dentre os quais podem se citar: modificações comportamentais, onde as populações de pragas reconhecem a presença do agroquímico e evitam o contato com o produto (MBOGO *et al.*, 1996; MATHENGE *et al.*, 2001; SPARKS *et al.*, 1989), redução na penetração cuticular, associada a modificações na sua composição do tegumento de insetos, por exemplo (STONE e BROWN, 1969); resistência metabólica, através do aumento da capacidade de metabolização de produtos químicos tóxicos, através de enzimas de detoxificação (HEMINGWAY e RANSON, 2000); e modificação nos sítios alvos dos agroquímicos (FFRENCH-CONSTANT; DABORN; GOFF, 2004 e MUTERO *et al.*, 1994). Logo, a resistência de pragas é classificada de acordo com os mecanismos de resistência que um indivíduo possui, ou mesmo quanto as substâncias químicas as quais o indivíduo é resistente. Neste sentido, surgem os conceitos de resistência múltipla e cruzada,

onde a resistência pode ocorrer para duas ou mais proteínas *Bt* (CASELEY, CUSSANS e ATKIN, 1991).

A resistência cruzada refere-se aos casos em que um único mecanismo confere resistência a duas ou mais proteínas inseticidas, normalmente proteínas com o mesmo sítio de ação (por exemplo, Cry1Ab e Cry1F e Cry1A.105 em *S. frugiperda*). No entanto, a resistência múltipla ocorre quando pelo menos dois diferentes mecanismos de resistência coexistentes conferem resistência a duas ou mais proteínas *Bt*, com modos de ação diferentes (por exemplo, Cry1F, Cry2Ab2 e Vip3Aa20) (CASELEY, CUSSANS e ATKIN, 1991).

O próximo item trata sobre os danos econômicos, propriamente ditos, que o estabelecimento e evolução da resistência de pragas sobre a cultura *Bt* é capaz de causar principalmente para o produtor rural, além de tratar sobre outros prejuízos econômicos, sociais e ambientais para outros agentes sociais, como a indústria agroquímica e biotecnológica e o próprio consumidor final.

3.2 Impactos econômicos, sociais e ambientais causados pela resistência de pragas

De acordo com Miranowski *et al.* (1986) o desenvolvimento da resistência, de uma maneira geral, em pragas-alvo tanto aos cultivos *Bt* quanto aos outros agentes de controle é capaz de causar sérias perdas e danos socioeconômicos e ambientais aos vários agentes sociais, ou seja, aos agricultores, indústria agroquímica e biotecnológica e aos próprios consumidores.

De acordo com Laxminarayan (2003) um dos impactos diretos da resistência se dá no âmbito da esfera da indústria agroquímica e biotecnológica, uma vez que a resistência promove a perda de eficácia ou falhas de controle da tecnologia *Bt* ou outros agentes de controle, gerando a perda precoce de uma tecnologia que, em geral, custa milhões e muito tempo para ser desenvolvida. Estima-se que o tempo necessário para o desenvolvimento de um agroquímico, por exemplo, seja entre sete e dez anos, dependendo de uma série de fatores. Também se soma ao tempo os custos envolvidos. Por exemplo, em 2000, o custo de pesquisa e desenvolvimento de uma nova molécula era de US\$ 184 milhões e em 2008 já estava em US\$ 256 milhões, em função das crescentes exigências regulatórias que demandam estudos mais detalhados a respeito da segurança toxicológica e ambiental dos produtos (IEAG, 2015).

Segundo Pimentel; Burgess (2014) o desenvolvimento da resistência causa uma redução no “ciclo de vida” dos cultivos *Bt*, bem como dos produtos agroquímicos, tornando-os menos eficazes e assim a indústria precisa diversificar sua produção, por meio do desenvolvimento de novas variedades transgênicas ou por meio de novos produtos químicos.

Isso representa um aumento drástico nos custos das indústrias agroquímicas, pois estes produtos exigem muitos anos de pesquisa para o seu desenvolvimento, demandando grandes investimentos. Além dos altos custos, soma-se o tempo que se torna cada vez mais longo para se obter o registro do Ministério da Agricultura (MAPA) dos produtos pesticidas e das culturas *Bt*, impactando na redução gradativa de portfólio de produtos eficientes da indústria agroquímica e biotecnológica e consequentemente na dificuldade de controle das pragas em campo. Neste caso, o desenvolvimento de resistência à uma tecnologia *Bt*, pode levar em última instância, a perda da viabilidade e patente dessa tecnologia.

A resistência também pode ser impactante para o consumidor, pois a redução do leque de tecnologias disponíveis para o controle de uma praga pode levar ao aumento do custo das poucas opções disponíveis no mercado, gerando consequências diretas para o consumidor final, como por exemplo, o aumento dos preços finais dos alimentos de origem agrícola (IEAG, 2015).

A resistência pode impactar também no meio ambiente e comércio internacional de commodities, pois quando a resistência começa a acumular-se, o produtor muitas vezes tenta superar o desempenho insatisfatório da planta *Bt* ou outros agentes de controle pelo aumento da dose ou a frequência das aplicações químicas. E este tipo de contramedida pode gerar possíveis contaminações do meio ambiente, contribuindo para o aumento de resíduos de agroquímicos nos alimentos, nas commodities agrícolas e nos alimentos para os animais.

Conforme argumento Kunz; Kemp (1994) são indissociáveis os problemas de resistência e os de resíduos nos alimentos, commodities e meio ambiente. E este problema acaba impactando diretamente o comércio internacional, uma vez que afeta as mais importantes barreiras não-tarifárias ao comércio quando os níveis excedem o limite máximo de resíduos (LMR) permitidos pelo país importador, ou ainda quando o país importador não possui um limite máximo de resíduos (LMR) definido, significando que qualquer quantidade detectável do produto tóxico pode levar a restrições às importações.

Além da geração de resíduos, a resistência também causa impactos negativos para o meio ambiente a medida em que ao aumentar as doses e números de aplicações inseticidas elimina-se grande quantidade de inimigos naturais na lavoura, os quais são agentes de controle populacional de pragas. O fato prejudica o eficiente fenômeno conhecido como controle biológico, que consiste em uma técnica que utiliza meios naturais, criada para diminuir a população de organismos considerados pragas.

3.2.1 Impactos econômicos da resistência de pragas à cultura *Bt* para o produtor rural

Embora sejam muitos os prejuízos causados pela evolução da resistência de pragas, no âmbito social e ambiental, ressaltam-se os danos econômicos ao produtor rural, que consiste no objetivo de estudo do presente trabalho.

Neste sentido, destaca-se que um dos impactos diretos da resistência é tornar os cultivos *Bt* e outros agentes de controle menos eficazes à prevenção aos danos causados pelas pragas às culturas. Isto implica diretamente na diminuição da produção agrícola e acaba exigindo que muitos agricultores passem a utilizar doses ou números de aplicações cada vez maiores de agroquímicos nas culturas com o intuito de tentar compensar a redução da eficácia dessas táticas para o controle das pragas. Desta forma, a resistência causa sérios danos econômicos ao agricultor, pois leva a falhas no controle, aumento do custo de produção, além de causar redução na produção das lavouras e consequente queda nos lucros da atividade agrícola.

O aumento nos custos de produção ocorre, pois, o produtor passa a ter a necessidade de realizar aumento das doses ou números de aplicações do produto que perdeu sua eficácia, ou então, muitas vezes os agricultores precisam adequar-se ao uso de pesticidas alternativos mais caros que ainda sejam eficientes (LAXMINARAYAN, 2003). No caso de evolução de resistência de pragas ao cultivo de plantas *Bt*, o custo de produção ao produtor rural pode se elevar de tal maneira a tornar a atividade produtiva inviável economicamente, pois o produtor que já paga mais caro pela semente geneticamente modificada³ ainda vê a necessidade de aumentar doses ou números de aplicações inseticidas, arcando com os custos destas aplicações excedentes necessárias para compensar a ineficiência de controle das pragas pela cultura *Bt*. Estes maiores custos com aplicações envolvem os gastos excedentes com os inseticidas e com as operações mecânicas necessárias para a pulverização.

Vale ressaltar, que o agricultor está sujeito a muitos fatores de risco durante a produção da cultura, como por exemplo alterações climáticas, que podem não fornecer as condições ideais para o cultivo, ou alterações de preços do produto final produzido. Neste caso, em safras que apresentam, más condições climáticas capazes de causar queda na produtividade, ou então

³ As sementes *Bt*, em geral, possuem preços superiores ao das convencionais, pois incluem em seu preço os benefícios que o produtor tem em adquiri-la, pela facilidade de seu manejo, como a menor exigência de aplicações químicas e menor necessidade de tratamentos culturais da lavoura, o que diminui também a necessidade de mão-de-obra a liberando para ser aplicada em outras atividades da fazenda (MENEGATTI e BARROS, 2007).

safras com baixa de preço do produto final, a renda arrecadada pelo produtor será menor que o de costume. E se for adicionado a este cenário pessimista de produção, mais um fator de risco que é a evolução da resistência de pragas-alvo da cultura *Bt*, na região de produção, isso ocasionará aumentos de custos de produção, devido aos maiores custos para o controle das pragas resistentes (custo com inseticida e custo com maquinário para aplicação), os quais adicionados aos maiores custos com a semente *Bt*, podem aumentar substancialmente o custo total de produção a ponto de superar a renda arrecadada pelo agricultor ao final da safra. Portanto todos esses fatores de risco podem contribuir para um aumento do risco de redução de lucro do agricultor, tornando a atividade agrícola inviável economicamente. Este trabalho, pretende mostrar que, conforme a frequência de pragas resistentes aumenta até ultrapassar o nível de dano econômico, aumenta o risco de o agricultor não obter lucros positivos com a sua atividade produtiva, tornando-a inviável economicamente.

Outro impacto direto causado pela resistência de pragas às culturas *Bt* ao produtor rural consiste no fato de que, além dos produtores de culturas *Bt*, existem outros agricultores que dependem de inseticidas à base de *Bt*, mas que não utilizam as culturas transgênicas *Bt* inseticidas. Por exemplo, de acordo com as diretrizes atuais, os sprays *Bt*, mas não as culturas *Bt*, podem ser usados como parte da produção agrícola orgânica e se as pragas evoluíram resistência a uma cultura *Bt*, os outros inseticidas à base de *Bt* provavelmente se tornariam também ineficazes contra essas pragas, e os agricultores orgânicos sofreriam maiores custos de controle de pragas. Em alguns países, como o Brasil, os inseticidas *Bt* são amplamente utilizados na produção agrícola convencional. Nesses países, a evolução da resistência pode prejudicar também os produtores convencionais. Em outras palavras, os agricultores que não possuem nenhum benefício de uma cultura transgênica de inseticidas podem ter que pagar os custos da falta de um manejo e gestão de resistência por parte de outros produtores que se beneficiam das culturas *Bt*.

Na literatura, algumas pesquisas buscaram mensurar os danos econômicos causados pela resistência de pragas, por exemplo, por meio do aumento do custo de produção com controle químico de pragas (devido a necessidade de aumento de dose ou número de aplicações para tornar o controle de pragas mais eficiente); pelas perdas em produtividade (queda de produção por área cultivada devido ao aumento dos danos causados pelas pragas à cultura) (PALUMBI et al., 2001 e GRAFIUS, 1997); pelo elevado custo de desenvolvimento da tecnologia e sua rápida depreciação (GRAFIUS, 1997); pelo aumento no custo para o governo em políticas de prevenção (PIMENTEL, 2005); restrição em mercados importadores dos

produtos finais, devido por exemplo ao uso de produtos proibidos ou sem registro, ou ainda pela presença de resíduos (KUNZ e KEMP, 1994).

Vários estudos foram realizados neste sentido, com intuito de valorar os custos e danos econômicos causados pela resistência, como Miranowski et al. (1986), Kunz; Kemp (1994), Grafius (1997), Pimentel et al. (1980), Palumbi et al. (2001), Laxminarayan (2003), Pimentel (2005) e Pimentel; Burgess (2014), os quais são tratados a seguir.

De acordo com Palumbi et al. (2001) somente nos Estados Unidos, os custos da resistência a pesticidas foram estimados em cerca de US\$ 10 bilhões por ano sob a forma de perdas da colheita pelos danos causados pelas pragas resistentes e sob a forma de aplicações adicionais devido à perda de eficácia dos produtos.

Em um estudo sobre os custos econômicos e ambientais resultantes da dependência do país com relação aos inseticidas, herbicidas e fungicidas, realizado por Pimentel; Burgess (2014), estimou-se um valor total de US\$ 9,6 milhões, em prejuízos sociais e ambientais. Adicionalmente, Pimentel (2005) estimou um custo de US\$ 470 milhões/ano para o governo em políticas de prevenção.

Grafius (1997), relatou o registro de resistência a inseticidas em 1984, em Michigan, no besouro da batata e problemas severos entre 1991 e 1994, com o aumento dos custos de controle do inseto e perdas de produtividade devido à resistência ao inseticida, mensurando perdas de produtividade média de 12,2% e de 20,5% nos distritos mais afetados. Mensurou também custos e perdas à indústria equivalente a US\$ 13,3 milhões em 1994, o que corresponde a 13,7% do valor da cultura. Neste mesmo estudo, o autor mostra que, apesar de se introduzir novos inseticidas, reduzindo perdas de produtividade, elevaram-se os custos, pois os novos inseticidas custaram cerca de 5 vezes mais do que os tradicionais.

De acordo com estudos de Kunz; Kemp (1994), o desenvolvimento da resistência de pragas a pesticidas desencadeia uma série de impactos que causam uma reação em cadeia: a resistência leva a deterioração da eficácia do produto pesticida, isso leva a uma maior quantidade de resíduos e, finalmente, torna-se um obstáculo ao comércio internacional.

Pimentel et al. (1980), estimaram que as perdas advindas da resistência, no nível da fazenda, remontavam a US\$ 118 milhões anualmente nos Estados Unidos devido a ocorrência de resistência. No entanto, essas perdas ultrapassam o nível da fazenda, comprometendo os investimentos que podem variar de US\$ 20 a 40 milhões para o isolamento, teste, desenvolvido e comercialização de novos inseticidas organossintéticos (KNIGHT e NORTON, 1989).

Todos estes estudos reforçam a necessidade de se realizar trabalhos que investiguem e mensurem os custos gerados pela resistência, com objetivo de auxiliar na conscientização social

sobre a necessidade de preservar os pesticidas e as culturas *Bt* já existentes, além de auxiliar em tomadas de decisões que permitam minimizar esses custos econômicos e sociais.

Neste contexto, um grande desafio para a economia é fornecer modelagens sofisticadas que permitam mensurar estes custos com maior precisão. A Figura 1 mostra de forma resumida um esquema dos impactos diretos da resistência de pragas.

Figura 1 - Impactos econômicos, ambientais e sociais causados pelo desenvolvimento da resistência em pragas.

Fonte: Elaboração própria.

3.3 Manejo da resistência de pragas a plantas *Bt*

As pragas que atacam as culturas agrícolas possuem uma série de características que as fornecem uma grande capacidade de se adaptarem a diferentes agentes de controle, dentre os quais as plantas *Bt*, as quais podem ter seu potencial para uso a longo prazo prejudicado, caso não haja a implementação de adequado manejo de resistência do inseto (MRI). Portanto, é importante definir qual a melhor forma de manejar as culturas *Bt* de forma que não ocorra seleção de indivíduos pragas resistentes.

As estratégias de manejo possuem o ideal de evitar a ocorrência da resistência. Desta forma, o manejo da resistência prioriza evitar ou retardar a evolução da resistência de modo preventivo, buscando evitar que este problema tome proporções capazes de causar danos econômicos, ao invés do modo reativo que prevê basicamente recuperar a suscetibilidade. No

entanto, muitas vezes, a maioria das ações de MRI são iniciadas após a constatação de falhas no controle de uma praga com o uso de um determinado agente de controle (BERNARDI *et al.*, 2016).

Desta forma, o termo manejo da resistência é usado para descrever um conjunto de medidas, que possuem como objetivo reduzir o potencial para o desenvolvimento de resistência das pragas aos agentes de controle, como por exemplo as plantas *Bt*, sendo parte integrante do Manejo Integrado de Pragas (MIP).

Pode-se dizer que existem basicamente dois tipos de estratégias de manejo para evitar ou retardar a evolução da resistência de pragas alvo em culturas transgênicas inseticidas, são elas a prevenção ou remediação (ROCHA *et al.*, 2014).

Dentre as estratégias preventivas estão: (i) expressão de toxinas em alta dose e adoção de refúgios estruturados; (ii) expressão de múltiplas toxinas *Bt* na mesma planta; (iii) expressão de toxinas *Bt* em baixas doses e controle biológico; (iv) toxinas com expressão seletiva; e (v) rotação de culturas transgênicas *Bt* e não-transgênicas (ANDOW; ALSTAD, 1998; GOULD, 1998; ALSTAD; ANDOW, 1995; GOULD, 1994 e HUANG; ANDOW; BUSCHMAN, 2011).

Ressalta-se que, para o MRI a plantas *Bt* tem sido usado as estratégias de alta dose e refúgio e pirâmide de genes (BERNARDI *et al.*, 2016).

3.3.1 Estratégia de alta dose e refúgio

De acordo com Tabashnik et al. (2009), a principal estratégia de manejo de resistência a plantas *Bt* é a chamada alta dose e refúgio. Define-se como planta de “alta dose” aquela que expressa proteína(s) inseticida(s) em concentração igual ou superior a 25 vezes a concentração letal correspondente à mortalidade de 99,9% da população suscetível da praga-alvo de controle resistência (GEORGHIOU; TAYLOR, 1977 e GOULD, 1998). Já uma planta de “baixa dose”, de acordo com Tabashnik (1994), é aquela que possui qualquer quantidade de proteína *Bt* que não esteja de acordo com o critério de alta dose.

Assume-se que, em condições de existência de qualquer mecanismo que confira ao inseto níveis de resistência baixos ou moderados, a expressão de alta dose da(s) proteína(s) inseticida(s) torna-se eficaz, pois a maioria dos heterozigotos serão mortos.

Quanto ao refúgio, este compreende a área onde determinada parcela da população não é exposta à pressão de seleção, ou seja, nesta área os insetos podem sobreviver, reproduzir e acasalar-se com os indivíduos sobreviventes da área *Bt* e produzir descendentes heterozigoto suscetíveis (RS).

Ressalta-se que, se houver expressão de alta dose da(s) proteína(s) inseticida(s) em determinada planta *Bt*, a evolução da resistência poderá ser retardada, de acordo com Bernardi et al. (2016) desde que duas condições ocorram, sejam elas: os raros insetos homozigotos resistentes (RR) da área de cultivo *Bt* devem acasalar com os insetos homozigotos suscetíveis (SS) oriundos da área de refúgio (cultivo não-*Bt*) e além disso, o heterozigoto (RS) resultante do cruzamento (SS $\times$ RR) deve ser morto pela concentração da(s) proteína(s) inseticida(s) expressas pela planta *Bt*. Portanto, se a herança da resistência for recessiva, haverá uma alta mortalidade dos insetos heterozigotos (RS) resultantes do cruzamento (SS $\times$ RR), porque estes irão se comportar fenotipicamente como indivíduos homozigotos suscetíveis (SS) (BRAVO e SOBERÓN, 2008).

No entanto, se houver expressão de baixa dose da(s) proteína(s) inseticida(s) em determinada planta *Bt*, os insetos heterozigotos (RS) resultantes do cruzamento (SS $\times$ RR) irão sobreviver, pois estes se comportam fenotipicamente como os homozigotos resistentes (RR), tratando-se de um caso de herança da resistência dominante (OMOTO, 2012).

Assim, a alta dose refere-se à expressão da(s) proteína(s) *Bt* num nível suficientemente elevado para causar a morte de todos os homozigotos suscetíveis (SS) e, praticamente todos os heterozigotos (RS). Os indivíduos heterozigotos (RS) apresentam um papel fundamental no manejo da resistência, pois estes indivíduos são os principais carreadores dos alelos de resistência em populações da praga-alvo de controle, enquanto a frequência da resistência é baixa (BERNARDI *et al.*, 2016). Neste caso, de acordo com Gould (1998) e Caprio; Summerford; Sims (2000) é importante atentar para a mortalidade dos heterozigotos (RS) durante o manejo da resistência a plantas *Bt*.

Mas se, eventualmente, não for possível implantar a estratégia de alta dose da(s) proteína(s) inseticida(s) no MRI, há uma solução alternativa para retardar a evolução da resistência, a qual consiste no aumento do tamanho da área de refúgio com intuito de compensar a sobrevivência dos heterozigotos (SR), ou seja, desta forma o alelo da resistência será “diluído” na população da praga (TABASHNIK, GOULD e CARRIERE, 2004).

A estratégia de alta dose e refúgio se tornará efetiva em retardar ou evitar a resistência, desde que algumas premissas sejam satisfeitas: deve haver baixa frequência inicial⁴ de alelos da resistência à(s) proteína(s) *Bt*; a herança da resistência deve ser recessiva, e é necessário o

⁴ De acordo com Gould (1998), frequência inicial é a frequência do alelo responsável pela expressão da resistência à(s) proteína(s) *Bt* numa população da praga-alvo de controle não exposta anteriormente à pressão de seleção.

uso de áreas de refúgio, ou seja, parte da plantação deve ser composta por plantas não-*Bt* (GOULD, 1998).

De acordo com Gould (1998), a frequência inicial do alelo de resistência deve ser baixa, ou seja, menor que 10^{-3} , de tal forma que a frequência de homozigotos resistentes (RR) seja baixa o suficiente para tornar extremamente improvável que dois insetos resistentes possam se encontrar, acasalar e gerar descendentes. No Brasil, por exemplo, há estudos recentes que demonstraram que os alelos da resistência a proteínas do grupo Cry1 expressas em milho *Bt* não são raros em populações de *S. frugiperda* (FARIAS et al., 2014a; BERNARDI et al., 2015). Em contrapartida, uma baixa frequência do alelo de resistência foi constatada para a proteína Vip3Aa20 também expressa em milho em populações de *S. frugiperda* (BERNARDI et al., 2014; BERNARDI et al., 2015b).

No Brasil, onde se observa produção intensiva de culturas, outro fator se torna importante para que a estratégia de alta dose e refúgio se torne efetiva, trata-se da dominância da resistência. Populações de insetos-praga, principalmente espécies polífagas, realizam fácil dispersão e ataque a diferentes culturas *Bt*, o que torna especial o controle de heterozigotos, na área de cultivo *Bt* onde ocorreu a pressão de seleção, e também nas culturas adjacentes que podem expressar diferentes proteínas *Bt*. Estudos recentes, conduzidos em laboratório, comprovaram que a maioria dos heterozigotos de *S. frugiperda* oriundos do acasalamento entre linhagens suscetíveis e resistentes a proteínas Cry ou Vip são mortos pelas tecnologias *Bt* de milho e algodão cultivados no Brasil, tornando a resistência uma característica funcionalmente recessiva (HORIKOSHI, BERNARDI, et al., 2016). Assim, a herança recessiva da resistência reforça a necessidade do plantio de áreas de refúgio para o manejo da resistência a plantas *Bt* (BERNARDI et al., 2014).

Ressalta-se ainda que as áreas de refúgio devem ser suficientemente atrativas para a oviposição, servindo como um “reservatório” de insetos suscetíveis (SS). Para que este método seja eficiente é necessário que as pragas das áreas de refúgio se dispersem para a área cultivada com as plantas *Bt*. E assim, espera-se que os raros indivíduos praga homozigotos resistentes (RR) se acasalem, na maioria das vezes, com indivíduos homozigotos suscetíveis (SS) oriundos das áreas de refúgio, originando uma geração subsequente composta novamente por indivíduos heterozigotos (RS), em sua maioria, que serão suscetíveis se a expressão da(s) proteína(s) *Bt* for de alta dose, conforme mostra a Figura 2. Porém, deve-se assegurar que os acasalamentos ocorram ao acaso, o que requer que ocorra dispersão das pragas das áreas de refúgio para qualquer parte da cultura *Bt* e vice-versa. Se não ocorrer a dispersão dos insetos antes do

acasalamento e se estes insetos acasalarem no local de emergência antes de dispersarem, pode haver um aumento na frequência de homozigotos resistentes (RR) (BERNARDI *et al.*, 2011).

Outro fator que também pode afetar o acasalamento ao acaso, é a distribuição das áreas de refúgio, a qual deve proporcionar a oportunidade de pragas resistentes que sobreviveram às toxinas das plantas *Bt*, se acasalar com pragas suscetíveis da área de refúgio. Portanto, para que seja possível o acasalamento aleatório de insetos resistentes (RR) com os suscetíveis (SS), a área de refúgio deve ser manejada e implementada, com tamanho e disposição, de acordo com as recomendações das empresas detentoras das tecnologias *Bt*, conforme ilustra a Figura 2 (BERNARDI *et al.*, 2016).

3.3.1.1 Recomendações para a semeadura da área de refugio

O tamanho adequado da área de refúgio depende do evento transgêncio utilizado e devem obedecer às regras da empresa registrante de cada evento. Para a safra 2015/2016 no Brasil, por exemplo, convencionou-se que, para a soja e para o algodão, 20% da área deve ser cultivada com híbridos ou variedades não *Bt*; para o milho, esse índice é de 10% (BERNARDI *et al.*, 2016). A recomendação é influenciada, por vários fatores, entre eles, a eficácia da proteína utilizada, e se o evento possui proteínas piramidadas (LEITE *et al.*, 2011). Outra recomendação técnica é que a área de refúgio deve ser formada por um bloco de plantas não-*Bt* que se encontre a menos de 800 metros da área com o cultivo *Bt*, ou seja, a distância máxima entre qualquer planta *Bt* e uma planta não *Bt* da área de refúgio não deve ser superior a 800 metros, pois essa seria a distância máxima verificada pela dispersão dos adultos de *S. frugiperda* no campo (VILARINHO, 2007). Ressalta-se que o refúgio deve ser plantado com um híbrido convencional de ciclo vegetativo similar e, ao mesmo tempo, e na mesma propriedade do plantio do milho *Bt* (MONSANTO, 2010). Todas essas recomendações visam permitir o sincronismo entre os cruzamentos dos possíveis adultos sobreviventes na área de milho *Bt* com suscetíveis provenientes da área de refúgio (Figura 3) (LEITE *et al.*, 2011).

O cultivo de faixas de refúgio dentro do campo com cultivo *Bt* é recomendável para aumentar a eficácia do refúgio em evitar ou retardar a evolução da resistência. Além disso, o refúgio deve ser plantado na mesma propriedade do cultivo da cultura *Bt* e ser manejado pelo mesmo agricultor, de modo a garantir a produção de indivíduos suscetíveis e não deve ser realizada a mistura de sementes *Bt* e não-*Bt*.

O risco para o produtor que não adotar a estratégia de refúgio é a rápida seleção de insetos pragas resistentes às toxinas do *Bt*. Desta forma, o produtor que não utilizar a prática do manejo da resistência será a primeira vítima da quebra da defesa, não obtendo controle das pragas-alvo com os híbridos de milho *Bt*. Portanto, a utilização da área de refúgio é essencial para garantir a manutenção da funcionalidade e da durabilidade da tecnologia *Bt*.

Figura 2 - Tipos de configurações da área de refúgio.

Fonte: Elaboração própria, com base em (BERNARDI *et al.*, 2016).

Figura 3 - Ilustração do comportamento, dispersão e acasalamento aleatório de insetos resistentes (RR) com os suscetíveis (SS), após implementação da área de refúgio, conforme as recomendações das empresas detentoras das tecnologias *Bt*.

Fonte: Elaboração própria, com base em (BERNARDI *et al.*, 2016).

3.3.2 Estratégia da pirâmide de genes

A primeira geração de plantas *Bt* lançadas comercialmente expressavam apenas uma proteína inseticida. Já na segunda geração surgiram as plantas que expressam duas ou mais proteínas com ação inseticida, essas foram denominadas plantas *Bt* “piramidadas”, as quais retardam a evolução da resistência mais eficientemente quando comparadas às plantas que expressam uma única proteína inseticida, principalmente por conta da baixa frequência inicial dos indivíduos resistentes às múltiplas toxinas. O uso dessas plantas *Bt* piramidadas, pertence à uma clássica estratégia de ataque múltiplo, que prega a utilização de dois ou mais agentes de controle em rotação ou mistura. Para tanto exige-se que os agentes de controle utilizados em mistura ou rotação apresentem modos de ação distintos e não possuam resistência cruzada (FERRÉ e RIE, VAN, 2002).

A estratégia da pirâmide de genes possui o princípio de que cada proteína inseticida da pirâmide expressa na planta *Bt* deve causar mortalidade elevada da praga que se deseja controlar. Neste caso, cada uma dessas proteínas deve eliminar senão todas, a maioria das pragas-alvo suscetíveis, por meio do chamado “controle redundante” (CARRIÈRE et al., 2016).

De acordo com Bates et al. (2005), este método assegura que, aqueles insetos que apresentam resistência a uma determinada proteína da pirâmide acabarão sendo mortos pela(s) outra(s) proteína(s) da pirâmide, e vice-versa. Portanto, a utilização deste método de plantas *Bt* “piramidadas” possui uma vantagem de controlar de forma mais eficiente todo o complexo de pragas em culturas que apresentam pragas múltiplas, uma vez que as espécies que são pouco suscetíveis a uma das proteínas podem ser mais suscetíveis a outra proteína expressa na planta *Bt*. Além disso, este método permite que o tamanho das áreas de refúgio seja reduzido, pois de acordo com estudos de modelagem observou-se que 5 a 10% de área de refúgio contendo plantas expressando duas proteínas de *Bt* puderam proporcionar a diluição de resistência equivalente a 30 a 40% de área de refúgio quando duas plantas transgênicas com uma única proteína são implantadas sequencialmente (BATES et al., 2005). Mas há a necessidade de não ocorrência de resistência cruzada, além de que cada proteína na pirâmide precisa ter herança recessiva de resistência, baixa frequência inicial do alelo de resistência e existência de custo adaptativo e resistência incompleta, para que haja sucesso de plantas *Bt* “piramidadas” de forma efetiva.

Segundo Bernardi et al. (2006) o uso de pirâmide de genes no Brasil tem sido pouco efetiva em evitar ou retardar a evolução da resistência, principalmente para *S. frugiperda*. Ressalta-se que as primeiras tecnologias de milho *Bt* liberadas comercialmente para o cultivo

expressavam uma única proteína inseticida, basicamente proteínas Cry1. No entanto, ao longo do tempo, com o intensivo cultivo das plantas de milho *Bt*, a frequência da resistência foi aumentando em populações de *S. frugiperda*, principalmente para Cry1F e Cry1Ab (FARIAS et al., 2014a; FARIAS et al., 2016; OMOTO et al., 2016), reduzindo o potencial de controle dessas pragas pela tecnologia de milho *Bt*, devido principalmente à ocorrência de resistência cruzada entre proteínas com semelhante modo de ação, como aquelas proteínas pertencentes ao grupo Cry1 (HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ et al., 2013; BERNARDI et al., 2015a; SANTOS-AMAYA et al., 2016).

Produtores de várias regiões do Brasil vêm relatado falhas de controle para chamada lagarta do cartucho (*S. frugiperda*) por tecnologias de milho *Bt* que expressam duas ou mais proteínas do grupo Cry1, ocasionando na necessidade de pulverização de inseticidas para complementar o controle. Diante deste cenário, para um correto manejo de resistência e controle efetivo desta praga é importante dar preferência para tecnologias *Bt* que expressam duas ou mais proteínas de grupos distintos, como por exemplo, Cry1, Cry2 ou Vip3A, pois as proteínas Cry2 e Vip3 apresentam modo de ação distinto entre si e de proteínas Cry1 (SENA; HERNANDEZ-RODRIGUEZ; FERRE, 2009; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ et al., 2013).

No entanto, para tecnologias de milho *Bt* que expressam duas ou mais proteínas inseticidas é igualmente importante fazer o plantio do refúgio para retardar ou evitar a evolução da resistência.

3.4 Adoção de plantas *Bt* no Brasil

Desde 1996 as plantas *Bt* vêm sendo utilizadas na agricultura mundial, mas no Brasil foram introduzidas somente em 2005, ano em que a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio), ligada ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), aprovou a liberação comercial das mesmas para o controle de insetos. A primeira planta *Bt* liberada no Brasil foi o algodão *Gossypium hirsutum* L., expressando uma única proteína de *Bt* nos tecidos da planta (CTNBIO, 2007 e CTNBIO, 2008). A taxa de adoção destas tem aumentado gradualmente, motivada pelos benefícios no controle de pragas e aumentos de produtividade.

De acordo Bernardi et al. (2016) atualmente existem dezesseis tecnologias *Bt* comercialmente cultiváveis, das quais 12 são de milho, quatro de algodão e apenas uma de soja, conforme mostra a Tabela 1.

Após a liberação do primeiro evento de milho resistente a insetos (YieldGard®) expressando a proteína Cry1Ab de *Bt*, que ocorreu em 2007, a taxa de adoção destas aumentou

gradualmente até os dias atuais, passando a ser utilizado de forma mais intensa nas safras no país, ganhando tantos mercados internos como externos. Essa maior participação do milho *Bt* na produção nacional deve-se, principalmente, aos benefícios no controle de pragas e aumentos de produtividade. Assim, posteriormente à liberação do primeiro evento de milho resistente foram aprovados outros eventos expressando outras proteínas de *Bt*, tais como Cry1F e Vip3A, bem como os eventos que expressam mais de uma proteína: Cry1A.105/Cry2Ab2, Cry1b/Vip3A, Cry1Ab/Cry1F e Cry1A.105Cry2Ab2/Cry1F (OMOTO, 2012).

De acordo Bernardi et al. (2016) atualmente existem dezesseis tecnologias *Bt* comercialmente cultiváveis, destas, doze são de milho, quatro de algodão e apenas uma de soja, conforme mostra a Tabela 1.

De acordo com informativos da Céleres de 2016, a área total cultivada com plantas *Bt* correspondeu a cerca de 19 milhões de hectares. Isso representa cerca de 40% da área de cultivo de milho, algodão e soja (CÉLERES, 2016).

Em 2016, o milho de primeira e segunda safra, correspondeu à segunda cultura com maior área de cultivo ocupando aproximadamente 12 milhões de hectares, o que representa cerca de 80% da área total de milho (CÉLERES, 2016). O algodão *Bt* ocupou uma área, correspondente a 66% do total cultivado em 2016 (CÉLERES, 2016); enquanto a soja *Bt*, por sua vez, foi cultivada em 93% da área total dessa cultura no Brasil (CÉLERES, 2016).

As Figuras 4 e 5 demonstram o crescimento da adoção do milho *Bt*, que vem se expandindo de forma crescente no decorrer dos anos. A safra de milho inverno ocupa a segunda posição na taxa de adoção de biotecnologia, com 90,4% da área total com milho inverno. Em suma, considerando a área de milho total (inverno e verão), a adoção de biotecnologia para o cereal totalizou 82,6% da área total, na safra de 2014/15. Nesta safra, o plantio do milho *Bt* deteve a maior área plantada em relação ao plantio do milho convencional (CÉLERES, 2016).

Atualmente todas as regiões de produção de milho cultivam praticamente somente plantas de milho *Bt*, quando comparadas as áreas de milho convencional. Dentre os estados Brasileiros, o Mato Grosso (MT) lidera com a maior área de cultivo de plantas *Bt*, com cerca de 5 milhões de hectares em 2016, o que corresponde a aproximadamente 10% do total da área ocupada plantas *Bt* no Brasil. Em seguida, Paraná aparece em segundo lugar, com aproximadamente 4 milhões de hectares, ou seja, cerca de 7% do total, e depois Rio Grande do Sul, com aproximadamente 2 milhões de hectares, cerca de 4% do total (Figura 6) (CÉLERES, 2016).

Tabela 1 - Resumo das principais tecnologias de milho *Bt* com resistência a insetos e herbicidas liberadas no Brasil.

Cultura	Tecnologia <i>Bt</i>	Pragas-alvo de controle		Ano de Liberação
		Lepidópteros	Coleópteros	
Milho	YieldGard®	Cry1Ab		2007
	Agrisure TL®	Cry1Ab		2008
	Herculex®	Cry1F		2008
	Viptera™	Vip3Aa20		2009
	VT PRO™	Cry1A.105 + Cry2Ab2		2009
	PowerCore™; VT PRO Max®	Cry1A.105 + Cry1F + Cry2Ab2		2010
	Viptera 3®	Cry1Ab + Vip3Aa20		2010
	Optimum™ Intrasect®	Cry1Ab + Cry1F		2011
	VT PRO® 3	Cry1A.105 + Cry2Ab2	Cry3Bb1	2011
	Herculex® Xtra	Cry1F	Cry34Ab1 + Cry35Ab1	2015
	Leptra®	Cry1Ab + Cry1F + Vip3Aa20		2015
Algodão	Bollgard®	Cry1Ac		2005
	WideStrike®	Cry1Ac + Cry1F		2009
	Bollgard II®	Cry1Ac + Cry2Ab2		2009
	TwinLink®	Cry1Ab + Cry2Ae		2011
Soja		Cry1Ac		2010

Fonte: (Bernardi *et al.*, 2016)

Figura 4 - Adoção da biotecnologia agrícola no Brasil, por cultura, em área cultivada (milhões de ha).

Fonte: Extraído do Informativo Biotecnologia da Céleres (2016).

Figura 5 - Taxa de adoção da biotecnologia agrícola no Brasil.

Fonte: Extraído do Informativo Biotecnologia da Céleres (2016).

Figura 6 - Adoção da biotecnologia na safra de 2014/15 de milho total (inverno e verão) por região.

Fonte: Extraído do Informativo Biotecnologia da Céleres (2016).

3.5 Status e casos registrados de resistência de pragas-alvo a plantas *Bt*

O *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) é uma bactéria Gram positiva presente no solo capaz de produzir cristais de proteínas, as delta endotoxinas, com ação letal sobre algumas espécies de insetos das ordens Lepidóptera, Coleóptera e Díptera. Existem mais de 50 famílias diferentes que foram descobertas e organizadas por um código numérico. Estas são classificadas de acordo com a sua especificidade em relação aos grupos de insetos (CARNEIRO *et al.*, 2009). Dentre estas proteínas, as mais conhecidas são as chamadas de proteínas cristal com a denominação Cry, que possui ação sobre formas jovens de insetos de algumas ordens, como as três citadas anteriormente. Nas últimas décadas, através dos avanços da biotecnologia, muitos dos genes provenientes da bactéria *Bt*, responsáveis pela expressão de proteínas inseticidas, vêm sendo incorporados em espécies de plantas cultivadas tais como milho (*Zea mays* L.), algodão (*Gossypium hirsutum* L.) e soja (*Glycine max* L.), surgindo as plantas geneticamente modificadas (GM) capazes de expressar essas proteínas inseticidas de *Bacillus thuringiensis* Berliner. Essas são conhecidas como plantas *Bt* e expressam continuamente tais proteínas em seus tecidos, apresentando elevada especificidade sobre as pragas da lavoura (BRAVO; SOBERÓN; GILL, 2005; JAMES, 2011).

Porém, a expressão contínua das proteínas *Bt* nos tecidos da planta tem acarretado uma elevada pressão de seleção sobre as pragas alvo, favorecendo a evolução da resistência em muitas dessas espécies (MCGAUGHEY, 1985; MCGAUGHEY; WHALON, 1992; ANDOW, 2008). Por isso, nos últimos anos, vários pesquisadores vêm chamando a atenção sobre o risco ambiental das culturas *Bt* pelo seu potencial de evolução de resistência nas pragas alvo.

De acordo com alguns autores como, Camilla; Neppl (2000) e Liang et. al (1998), populações de várias espécies de lepidópteros, coleópteros e dípteros vem desenvolvendo resistência à toxina *Bt* em condições de laboratório. Liang et al. (1998), por exemplo, detectaram resistência à toxina *Bt* em algumas populações de *Helicoverpa armigera* na China. Esses resultados alertam para um possível desenvolvimento de resistência das pragas a culturas transgênicas inseticidas que contêm a toxina *Bt*, o que anularia todos os benefícios dessa nova tecnologia cultivada em milhões de hectares, principalmente de soja, milho e algodão *Bt* por todo o mundo.

Vários trabalhos de seleção de populações de insetos resistentes em condições de laboratório têm demonstrado que as pragas-alvo das culturas *Bt* podem evoluir para resistência, conforme mostra a Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 - Trabalhos de seleção de populações de insetos resistentes em condições de laboratório que evidenciaram sobrevivência de linhagens de insetos a proteínas *Bt* expressas em plantas *Bt* comerciais.

Espécie/família	Origem	Agente de seleção ^a	Linhagem	Proteína a qual se registrou resistência	Referências
<i>Heliothis virescens</i> (Noctuidae)	Carolina do Norte	Cry1Ab (MR)	SEL	Cry 1Ab	Sims; Stone, 1991
	Carolina do Norte	Cry1Ac (T)	CP73-3	Cry 1Ab	Gould et al., 1992
	Carolina do Norte	Cry1Ac (T/MR)	YHD2	Cry 1Ac	Gould et al., 1995
	Carolina do Norte	Cry1Ac (T)	KCB	Cry 1Ab Cry 1Aa Cry 1Ac	Forcada et al., 1999
<i>Helicoverpa zea</i> (Noctuidae)	Mississipi e Texas	Cry1Ac (PT)	FZ	Cry 1Ac	Luttrell; Wan; Knighten, 1999
<i>Pectinophora gossypiella</i> (Gelechiidae)	Vários locais dos EUA	Cry 1Ac (algodão Bt/MR)	APHIS-98R	Cry 1Ac	Liu et al., 2001
	Arizona	Cry 1Ac (MR)	AZP-R	Cry 1Ac	Tabashnik et al., 2002
<i>Diatraea saccharalis</i> (Crambidae)	Louisiana	Cry 1Ab (MVT)	Isolinha 52	Cry 1Ab	Huang; Leonard; Andow, 2007

Fonte: Extraído de Bernardi et al. (2011).

Nota: ^a Diferentes formas de seleção foram utilizadas: microencapsulado recombinante expressando genes *cry* (MR); proteínas (PT); toxina ativa (T); e material vegetal transformado expressando gene *cry* (MVT).

A partir do ano de 2007 foram reportados vários casos de evolução da resistência a campo de pragas-alvo de plantas *Bt*, conforme indica a Tabela 3.

Tabela 3 - Trabalhos que relataram casos de resistência de insetos a plantas *Bt*, em condições de campo.

Espécie	Origem	Resistência a	Referências
<i>Helicoverpa zea</i>	EUA	Algodão <i>Bt</i> (Proteína Cry 1Ac)	Tabashnik et al., 2008
<i>S. frugiperda</i>	Porto Rico Brasil	Milho <i>Bt</i> (Proteína Cry 1 F)	Storer et al., 2010
<i>Busseola fusca</i>	África do Sul	Milho <i>Bt</i> (Proteína Cry 1Ab)	Van Rensburg, 2007
<i>Pectinophora gossypiella</i>	Índia	Algodão <i>Bt</i> (Proteína Cry1Ac)	Dhurua; Gujar, 2011
<i>Diabrotica virgifera</i>	EUA	Milho <i>Bt</i> (Proteína Cry3Bb1)	Gassmann et al., 2011

Fonte: Extraído de Bernardi et al. (2011).

Neste contexto, de acordo com o Relatório Internacional Life Science Institute – Health and Environmental Science Institute (1998) existem diversas consequências negativas da evolução de resistência de pragas às culturas *Bt*, podendo-se citar: a perda das culturas *Bt* como opção de controle de pragas, perda das formulações tradicionais de *Bt* para controle de praga, aumento do uso de inseticidas sintéticos caso as culturas e formulações *Bt* se tornem ineficientes no controle das pragas alvo, impacto sobre a percepção da sociedade sobre os benefícios da biotecnologia em um sentido mais amplo.

O desenvolvimento de resistência a plantas transgênicas *Bt* constitui um problema sócio econômico sério, uma vez que é capaz de anular os benefícios dessa nova tecnologia que é cultivada em milhões de hectares em todo o mundo. Entre esses benefícios, pode-se citar: a redução no uso de inseticidas de alta toxicidade para o homem (MAIA, 2003).

3.5.1 Potencial de *Spodoptera frugiperda* para evolução de resistência a proteínas de *Bt*

Uma das principais pragas que acometem diversas culturas, inclusive a do milho, no Brasil é a lagarta-do-cartucho ou lagarta militar, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (CRUZ, 1995). Esta é uma espécie nativa das Américas que ocorre desde o Uruguai e norte da Argentina até os estados do sul dos EUA. No continente Americano e no Brasil, este inseto causa sérios problemas fitossanitários, provocando prejuízos a uma série de culturas de importância econômica, com destaque para o milho (CRUZ, 1995 e YU; NGUYEN; ABO-ELGHAR, 2003).

A *Spodoptera frugiperda*, apresenta algumas características bioecológicas importantes como o alto potencial reprodutivo, com capacidade de completar mais de oito gerações por ano em alguns sistemas de produção de cultivos do Brasil; o ciclo biológico relativamente curto;

polifagia, capaz de atacar diversas culturas (milho, algodão, arroz, milheto, sorgo, soja entre outras); elevada capacidade de dispersão dos adultos, permitindo que este inseto se dissemine rapidamente pelas plantas hospedeiras (FITT et al., 2006; SPARKS, 1979). Todas essas características bioecológicas associadas a um cenário de sobreposição e sucessão de cultivos de plantas hospedeiras em algumas regiões, acaba expondo as populações de *S. frugiperda* a uma elevada pressão de seleção por proteínas de *Bt*, proporcionando um cenário favorável para a evolução da resistência e comprometimento das táticas de controle.

Storer et al. (2010) e Farias et al. (2014a) relataram pela primeira vez a resistência desenvolvida em *S. frugiperda* à proteína Cry1F em Porto Rico e no Brasil, tendo como fatores que contribuem para a evolução dessa resistência em campo: o cultivo intensivo de plantas *Bt* com a expressão em baixa dose da proteína inseticida e a baixa adoção de áreas de refúgio, os quais acabam expondo a praga *S. frugiperda* a constante pressão de seleção durante todo o ano. Esse caso tornou-se o exemplo mais rápido de evolução de resistência a campo para uma cultura *Bt*, levando à retirada desse evento do mercado com o objetivo de restabelecer a suscetibilidade de *S. frugiperda* à proteína Cry1F, buscando resgatar a tecnologia em Porto Rico (STORER et al., 2010).

Uma das principais ameaças a sustentabilidade das tecnologias *Bt* para o controle de pragas no Brasil, é a evolução da resistência cruzada entre proteínas *Bt* expressas nas plantas *Bt* cultivadas. Os recentes relatos de evolução da resistência de *S. frugiperda* a Cry1F e Cry1Ab, por exemplo, indicam o forte potencial de comprometimento de todas as tecnologias de milho e algodão *Bt* que expressam proteínas do grupo Cry1 e tem como praga-alvo de controle essa espécie.

Atualmente, existem vários estudos que trazem evidências de resistência cruzada entre as proteínas Cry1F, Cry1Ac, Cry1Ab e Cry1A.105 em *S. frugiperda* (HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ et al., 2013; VÉLEZ et al., 2013; HUANG et al., 2014; BERNARDI et al., 2015b; SANTOS-AMAYA et al., 2016). De acordo com estudos recentes de Bernardi et al. (2015b) e Horikoshi et al. (2016a), a praga *S. frugiperda* resistente à proteína Cry1F expressa no milho *Bt* é capaz de apresentar alta sobrevivência sob o cultivo do milho que expressa proteínas do grupo Cry1 e Cry2 de forma isolada ou em pirâmide. E além do milho *Bt*, observou-se que linhagens de *S. frugiperda* resistentes a proteínas Cry1 também apresentaram elevada sobrevivência em tecnologias de algodão *Bt* (HORIKOSHI, BERNARDI, et al., 2016).

Com relação a proteína Cry2Ab2 expressa tanto no milho *Bt* quanto no algodão *Bt* observou-se, por meio de estudos, que está apresenta baixa similaridade de aminoácidos com as proteínas Cry1, de forma que não compartilham o mesmo sítio de ligação. Assim, as

proteínas Cry2Ab2 indicaram um baixo potencial de resistência cruzada com proteínas Cry1 (HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ et al., 2013; CARRIÈRE; CRICKMORE; TABASHNIK, 2015). Mas, de acordo com Bernardi et al. (2015b); Santos-Amaya et al. (2015); Horikoshi et al. (2016a), quando expressa de forma isolada no milho *Bt*, a proteína Cry2Ab2, apresenta baixa toxicidade para *S. frugiperda*, não sendo capaz de causar morte completa dos insetos resistentes a proteínas Cry1.

Outros estudos, Horikoshi et al. (2016a); Yang et al. (2016), demonstraram que, a proteína Vip3A expressa em milho *Bt* apresenta elevada toxicidade para linhagens de *S. frugiperda* resistentes as proteínas Cry1 e Cry2, devido à ausência de resistência cruzada entre proteínas Vip e Cry, uma vez que as proteínas Vip possuem sítios de ligação diferente das Cry, o que ocasiona um modo de ação distinto (SENA; HERNANDEZ-RODRIGUEZ; FERRE, 2009; GOUFFON et al., 2011).

Neste contexto, é interessante ressaltar que, uma possibilidade de prolongar a vida útil dos cultivos *Bt* talvez seria cultivar plantas piramidadas que expressam proteínas *Bt* de grupos distintos (Cry1, Cry2 e Vip) objetivando reduzir a probabilidade de evolução da resistência cruzada nas populações de pragas-alvo de controle (BERNARDI, DOURADO, et al., 2014).

Recentemente a Dupont realizou uma pesquisa em conjunto com laboratórios da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas (MG), e da Embrapa Agrossilvipastoril, em Sinop (MT) para avaliar o percentual de sobrevivência da lagarta do cartucho em milho com as tecnologias *Bt* mais plantadas em Mato Grosso, a VT Pro, Herculex e Viptera. De acordo com a pesquisa da Embrapa Milho e Sorgo, ainda não foi encontrada resistência na tecnologia Viptera. No entanto a tecnologia Herculex apresentou um alto percentual de insetos sobrevivendo em milho *Bt*. E por sua vez, a tecnologia VT Pro apresentou baixo percentual de lagartas resistentes. Conforme os resultados apresentados por essa pesquisa há indícios de que os insetos resistentes já estão presentes na população de pragas, sendo necessário dobrar a atenção com estratégias de manejo de resistência como o refúgio e manejo integrado de pragas. O estudo indica ainda que a evolução da resistência para a lagarta *Spodoptera frugiperda* na tecnologia VT Pro não tem ocorrido com a mesma velocidade do observado para a tecnologia Herculex (EMBRAPA, 2016).

3.6 Frequencia crítica do alelo de resistência na área da cultura *Bt*

Este item trata, de forma sucinta, sobre a definição de frequência crítica do alelo de resistência na área da cultura *Bt*, apresentada na literatura, buscando mostrar a importância deste conceito para o melhor entendimento de como a evolução da resistência de pragas causa dano econômico ao produtor rural.

Com o intuito de conceituar a frequência crítica ressalta-se que, a aplicação constante de um mesmo agente de controle, no caso das plantas *Bt*: a expressão contínua das proteínas inseticidas em seus tecidos, somada à não adoção de um correto manejo de resistência, gera uma pressão de seleção sobre uma população inicial de pragas, eliminando as suscetíveis e possibilitando a evolução daqueles indivíduos “pré-adaptados” resistentes, que acabam sobrevivendo e se reproduzindo originando descendentes igualmente resistentes. Assim, a frequência do alelo de resistência aumenta na população de pragas até atingir uma frequência crítica de indivíduos praga resistentes acima da qual se considera que a tecnologia *Bt* se tornou inviável devido ao nível de dano causado pela população de insetos resistentes. Assim, a frequência crítica de pragas resistentes é suficiente para provocar dano econômico em uma determinada cultura, como resposta a uma falha no controle dessa tecnologia (Figura 7).

Figura 7 - Efeito da injúria provocada por insetos sobre a produção.

Fonte: Elaboração própria, baseado em Zanetti et al. (2005).

Em uma situação de frequência de alelos de resistência abaixo da frequência crítica, as pragas-alvo das plantas *Bt* são eficientemente controladas por essa tecnologia, sem

necessidade de aplicações inseticidas como forma de complemento de controle. Por conta desse benefício, o produtor prefere pagar um preço mais alto pela semente *Bt*, que já incorpora em seu preço, o custo do controle químico que o produtor deixa de aplicar.

No entanto, o cenário atual da agricultura brasileira, caracterizado por ainda conter falhas na adoção do correto manejo da resistência de insetos, acaba contribuindo para acelerar o aumento da frequência de alelos de resistência nas populações praga-alvo das plantas *Bt*. Essas falhas no manejo de resistência podem ser evidenciadas pela pressão de seleção causada pela sucessão de cultivos *Bt*, não empregando uma rotação entre culturas *Bt* e convencional, e pela ausência de adoção de áreas de refúgio.

Assim, a partir do momento em que se atinge a frequência crítica de pragas resistentes, indicando que houve falha de controle da planta *Bt*, o agricultor passa a intensificar o nível de controle químico inseticida a fim de compensar o desempenho insatisfatório dessa tecnologia. Comportamento este decorrente de sua expectativa de que, diminuindo a densidade populacional de pragas resistentes, as injúrias causadas nos cultivos se reduzam, permitindo aumentar o nível de produção.

Este conceito está baseado na ideia de que, à medida em que a densidade populacional de uma praga se eleva, a produção da cultura tende a reduzir, pois na relação inseto-praga $\times$ planta, os insetos-praga alimentam-se das plantas para sobreviverem e estas, por consequência, deixam de produzir a mesma quantidade de produtos gerados por plantas que não foram danificadas por estes insetos. Do ponto de vista do manejo integrado de pragas (MIP), o inseto provoca uma injúria ao se alimentar de uma planta cultivada, a qual consiste em qualquer alteração deletéria decorrente da ação deste inseto.

Desta forma a planta injuriada perde produção, que pode ser quantificada monetariamente, recebendo o nome de Dano Econômico⁵ (Figura 8).

⁵ Dano Econômico é definido como qualquer perda econômica decorrente de uma injúria causada por uma praga à uma cultura. De acordo com Stern et al. (1959) é a quantidade de dano que justifica o custo de medidas de controle.

Figura 8 - Efeito da injúria provocada por insetos sobre a produção.

Fonte: Elaboração própria, baseado em Zanetti et al. (2005).

Contudo, o investimento em controle químico representa um custo adicional para o agricultor. Sendo assim, o produtor precisa saber qual o custo máximo com o qual pode arcar, e que proporcione o maior controle das pragas possível, de tal forma que a sua atividade agrícola seja viável economicamente. Ou seja, de forma que a atividade produtiva lhe traga maior renda em detrimento dos custos produtivos, levando sempre em consideração que, a intenção de se adotar a tecnologia *Bt*, é que os seus benefícios, isto é, a redução que ela promove nos custos com aplicações inseticidas, sejam superiores ao custo da sua adoção, correspondente ao valor pago pela semente *Bt*.

Para tanto o produtor precisa otimizar os seus investimentos e o nível de produção agrícola a fim de maximizar o lucro, que corresponde à diferença entre receita (total) e custo (total).

Para descobrir o nível de produção e custos com investimentos capaz de maximizar o lucro do produtor rural é necessário analisar sua receita e seus custos fixos e variáveis.

Supondo que o nível de produção do agricultor, adotando o cultivo *Bt*, seja q e que ele obtenha a receita R . Essa receita será igual ao preço do produto, p , multiplicado pelo número de unidades vendidas, obtidas em função do nível de controle expresso pelo método de controle (x) – dado pela expressão das proteínas inseticidas no tecido da planta *Bt*. Ou seja, $R = pQ(x)$. O custo da produção, C , também depende do nível de produção e do nível de controle.

Então, o lucro é descrito matematicamente conforme a eq. (1):

$$L = pQ(x) - C(x) \quad (1)$$

Em que: L é o lucro; p é o preço do produto; $Q(x)$ é a quantidade do produto que se obteve em função do método de controle (x); x é o método de controle; $C(x)$ é o custo da aplicação do método de controle (x).

Para maximizar os lucros, o produtor opta pelo nível de produção obtido pela adoção de um determinado método de controle, para o qual a diferença entre receita e custo seja máxima. Esse princípio é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Relação custo-benefício do controle de pragas.

Fonte: Elaboração própria, baseado em Zanetti et al. (2005).

A curva da receita, $R(q)$, é uma linha curva, que reflete a idéia de que o produtor só consegue vender um nível maior de produto reduzindo o preço. A inclinação dessa curva é a receita marginal, que mostra em quanto varia a receita quando o nível de produção se eleva em uma unidade, em consequencia do aumento de uma unidade de controle.

Ainda se apresenta, na Figura 9, a curva de custo total, $C(q)$. A inclinação dessa curva, que mede o custo adicional da produção de uma unidade a mais de produto obtido pelo aumento

de uma unidade a mais de controle, é o custo marginal do produtor. Observa-se que o custo total, $C(q)$, é positivo quando o produto é zero, porque há custos fixos no curto prazo.

Para o produtor ilustrado na Figura 9, o lucro é negativo em níveis baixos de produção, pois a receita é insuficiente para cobrir os custos fixos e variáveis. No entanto, à medida que o nível de produção aumenta, devido à maior eficiência de controle da planta $Bt(x)$, a receita cresce mais rapidamente do que o custo, e o lucro se torna positivo. O lucro continua a crescer até que o nível de produção chegue a q^* unidades, produzidas devido ao uso de x^* unidades de controle (que corresponde à eficiência máxima de controle das plantas Bt). Nesse ponto, a receita marginal e o custo marginal são iguais, e a distância vertical entre a receita e o custo, AB , atinge seu comprimento máximo. Desta forma, q^* é o nível de produto que torna o lucro máximo.

Nota-se que, ao atingir a frequência crítica de pragas resistentes, ocorre a falha de controle da tecnologia Bt , verificada pela diminuição na sua eficiência contra as pragas-alvo dessa cultura, o que gera a necessidade da aplicação de níveis de controle acima de x^* , representado pela intensificação do controle químico inseticida complementar. Porém, o fato acarreta em aumento dos custos variáveis, principalmente com insumos (inseticidas) e operações mecânicas para pulverização, aos quais se somam os altos custos da semente Bt , o que eventualmente causa um crescimento do custo total de produção mais rápido do que o da receita total, ou seja, a receita marginal torna-se menor do que o custo marginal. Assim, o lucro torna-se menor do que o máximo possível quando o nível de controle cresce além de x^* unidades de controle. Aqui, é importante ressaltar que quando se atinge a frequência crítica de pragas resistentes, há dano econômico, pois a partir desse momento, o custo marginal do produtor se torna superior à sua receita marginal.

A regra de que o lucro é maximizado quando a receita marginal é igual ao custo marginal é válida para todas as empresas, sejam competitivas (como é caso da produção agrícola) ou não. Essa importante regra pode também ser deduzida algebricamente conforme indica a eq. (2). O lucro é maximizado no ponto em que um incremento adicional no nível de produção, decorrente do incremento de um nível adicional de controle, mantém o lucro inalterado (isto é, $dL/dx = 0$):

$$\frac{dL}{dx} = p \left[\frac{dQ(x)}{dx} \right] - \left[\frac{dC(x)}{dx} \right] = 0 \quad (2)$$

Em que $\frac{dQ(x)}{dx}$ é a receita marginal, RMg , e $\frac{dC(x)}{dx}$ é o custo marginal, CMg .

Desta forma, pode-se concluir que o lucro é maximizado quando $RMg - CMg = 0$, e portanto, $RMg = CMg$.

No caso da ocorrência de pragas resistentes no cultivo de uma planta *Bt* acima da frequência crítica tem-se que o $CMg > RMg$, e por esse motivo a resistência, nesse caso, é capaz de gerar danos econômicos ao produtor rural que se igualam ao seu custo de controle adicional. Ou seja, o custo da resistência, neste caso, será dado pelo custo das aplicações inseticidas adicionais, uma vez que no cultivo *Bt*, quando expressando sua máxima eficiência no controle de insetos-praga, em tese é previsto que não haja necessidade de aplicação de controle químico.

A Figura 10, mostra graficamente a derivada do lucro (dL/dx) em relação à variação na intensidade de controle das pragas. Observa-se que, com o aumento da intensidade de controle, a curva de incremento dos custos registra valores mais elevados. Contudo, conforme se intensifica o controle, a curva da receita marginal decresce. O lucro é representado pela área formada pelo triângulo “*abc*”, que é derivado da diferença entre essas duas curvas e é maximizado quando elas se interceptam no ponto x_0 .

Pela Figura 10, observa-se que os preços dos produtos se constituem em outro fator capaz de afetar o nível ótimo de intensidade de controle de pragas. Quando o preço do produto sobe, o retorno (ou benefício) do controle de pragas também deve aumentar, uma vez que este fato possibilita ao produtor investir mais no controle de pragas, para reduzir mais os danos e obter maior produção e maior lucro. Logo, a intensidade de controle aumenta quando o preço do produto se eleva, pois a curva de incremento dos custos intercepta a das receitas num nível de intensidade maior x_1 .

Figura 10 - Derivada da relação custo benefício do controle de pragas (P_1 representa um produto agrícola com preço mais baixo e P_2 representa um produto com nível de preços mais alto).

Fonte: Elaboração própria, baseado em Zanetti et al. (2005).

Nota: P_1 representa um nível menor de preço do produto; P_2 representa um nível maior de preço do produto.

Dependendo da variação do preço do produto agrícola a receita do produtor será maior, e se os custos não aumentarem, o produtor obterá maior lucro se utilizar uma intensidade de controle igual a x_0 ou x_1 . Com a intensidade de controle acima desses pontos, qualquer investimento ocasionará uma perda econômica para o produtor. Essa perda é representada pela área formada pelo triângulo “ bdx_2 ”. Um ponto x_2 qualquer representará a intensidade de controle necessária para eliminar todos os indivíduos praga de um cultivo, mas também representará uma perda econômica máxima obtida com esse nível de controle adotado. O fato deve-se ao aumento no custo de controle acima do ideal.

Na entomologia, utiliza-se um termo cuja definição se assemelha à de frequência crítica de alelos de resistência, trata-se do Nível de Dano Econômico, que se refere à densidade populacional do organismo praga na qual ele causa prejuízos de igual valor ao custo de seu controle. Porém essas terminologias não possuem o mesmo significado, já que o NDE é um conceito que eventualmente não se aplicaria para cultivos *Bt*, somente para cultivos convencionais, quando se utiliza o controle químico por agrotóxico. Não há um consenso entre entomologistas se o termo NDE pode, de fato, ser empregado para o caso do controle inseticida via cultivos *Bt*, pois neste caso o custo do tratamento ou controle já está embutido no custo da

semente *Bt*. Ou seja, no preço da genética o produtor já paga pela vantagem que terá por não necessitar realizar aplicações químicas para o controle.

O nível de dano econômico pode ser calculado com base na eq. (3), proposta por Lindquist; Kropff (1996):

$$NDE = \frac{C}{R * P * \left(\frac{i}{100}\right) * E} \quad (3)$$

Na eq. (3), NDE é o nível de dano econômico (plantas m²); C é o custo do controle (custos do produto agrotóxico e da aplicação, em reais ha⁻¹); R é o rendimento da cultura (kg ha⁻¹); P é o preço da cultura (reais kg⁻¹); i é a porcentagem de perda de rendimento da cultura por unidade de praga quando sua densidade se aproxima de zero; E é o nível de eficiência do produto agrotóxico (%).

Desta forma, observa-se que o nível de dano econômico, embora tomado muitas vezes como um valor fixo, é variável em função dos fatores mostrados acima, como o preço do produto agrícola (quanto maior o preço do produto, menor o nível de dano econômico), o custo de controle, a capacidade da praga em danificar a cultura, susceptibilidade da cultura à praga e eficiência do produto agrotóxico (LINDQUIST e KROPFF, 1996).

O Nível de Ação ou Controle (NA ou NC) constitui outro conceito importante no Manejo Integrado de Pragas (MIP), sendo utilizados rotineiramente nas atividades regulares das culturas, e cuja discussão cabe nesta seção.

O NA ou NC é a densidade populacional de uma praga a partir da qual devem ser tomadas as medidas de controle, evitando que essa população cause danos econômicos ao produtor. Portanto, o agricultor precisa acompanhar a flutuação populacional da praga ao longo do tempo, aplicando o controle somente no momento em que for constatado que a densidade das pragas atingiu um valor igual ou superior ao NC. Desta forma, a densidade populacional da praga é mantida no Ponto de Equilíbrio, sem causar danos econômicos (Figura 11).

Figura 11 - Comportamento da densidade populacional de um organismo no tempo com relação ao nível de dano econômico.
Fonte: Elaboração própria, baseado em Zanetti et al. (2005).

Neste aspecto, cabe ressaltar a importância da adoção de boas práticas dentro do Manejo Integrado de Pragas (MIP)⁶, com intuito de manter a densidade de pragas nesse Ponto de Equilíbrio ou abaixo do NDE.

⁶ O manejo integrado de pragas (MIP) é uma filosofia de controle de pragas que procura preservar e incrementar os fatores de mortalidade natural, através do uso integrado de todas as técnicas possíveis de combate, selecionadas com base em parâmetros econômicos, ecológicos e sociológicos, visando a manter a densidade populacional de um organismo abaixo do nível de dano econômico. Desta forma, o MIP promove o controle racional das pragas, por meio da associação de diferentes táticas, como uso de cultivares mais resistentes às pragas, controle biológico, prioridade a agroquímicos mais seletivos aos insetos benéficos e mais seguros ao homem e ao meio ambiente, enfatizando, principalmente, o uso racional dos químicos (Picanço, 2010).

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas algumas considerações sobre a metodologia empregada para a análise do impacto econômico da resistência de pragas, principalmente para o produtor rural, identificadas na literatura. São exemplificados alguns casos da literatura, especialmente a internacional, mostrando alguns modelos teóricos utilizados para embasar a análise do impacto econômico da resistência e, posteriormente, apresentam-se os dados e a metodologia adotados no estudo de caso proposto neste trabalho.

4.1 Referencial metodológico

O impacto ou custo da resistência pode ser estudado de várias formas: ele pode ser dado por exemplo, pelos custos adicionais que os produtores têm em função da resistência e da necessidade de usar mais pesticidas, afetando seus lucros no médio e longo prazo; o impacto da resistência também pode ser estudado pelo modo como ela afeta a otimização do lucro ou ainda avaliando seu valor pela perda das patentes sejam as dos pesticidas ou as das tecnologias genéticas.

Assim, o propósito deste capítulo é analisar as alternativas de avaliação e quantificação de impactos econômicos causados pelo desenvolvimento da resistência de pragas aos agroquímicos e à tecnologia *Bt*. Além de demonstrar os dados e a metodologia adotada no estudo de caso para avaliar a viabilidade econômica do cultivo de milho *Bt* sob condições de evolução da resistência de *Spodoptera frugiperda*. Este tipo de análise é relevante pois quando se mensura com mais precisão os prejuízos para a agricultura, e mesmo para a indústria, fica mais fácil argumentar a favor do manejo integrado de pragas e da adoção de práticas sustentáveis. Isso contribui para a sensibilização dos produtores e para sua tomada de decisão, assim como para os demais agentes da cadeia de produção, cujas ações conjuntas são essenciais para atenuar os problemas resultantes da resistência.

Embora os prejuízos causados por resistência, seja quando leva à perda do valor das patentes, à elevação dos custos de produção, ou a danos ambientais, muitas vezes sejam evidentes, nem sempre são suficientes para guiar melhores decisões dos agentes produtivos.

Neste contexto, acredita-se que a relevância deste estudo reside no fato de que, ao se comprovar com dados a magnitude dos efeitos econômicos não só de curto, mas de médio e longo prazos, as decisões privadas (e públicas em termos de regulação) sejam influenciadas e

reconheçam a importância do MIP, conseqüentemente, o seu potencial para contribuir com a desaceleração da resistência.

Apesar da importância, na literatura brasileira são escassas informações sobre avaliação do impacto econômico da resistência de pragas a agroquímicos ou a tecnologias de transgenias como o *Bt*. Desta forma, um dos entraves enfrentados neste estudo reside justamente na evidente escassez de literatura nacional. Porém, o problema já vem sendo foco de alerta em países mais desenvolvidos, tais como os da Europa, Austrália e EUA. Desta forma, a literatura citada a seguir compreende basicamente trabalhos internacionais.

Na literatura internacional muitos trabalhos relatam o problema do desenvolvimento da resistência de pragas principalmente a agroquímicos, abordando a relevância da gestão da resistência, a qual visa uma melhor gestão dos recursos durante longos períodos, com o objetivo de maximizar o lucro ou minimizar custos em uma estrutura comercial com conseqüente desaceleração do desenvolvimento da resistência. Estes trabalhos enfocam a importância das decisões econômicas dos gestores, que constituem um problema de otimização, cujo objetivo é obter o maior lucro (ou menor custo) sobre algum período de decisão.

Vários destes trabalhos tratam da questão do impacto econômico da resistência abordando a questão do nível de dano econômico, ou seja, a forma como a evolução da frequência de pragas resistentes afeta a economia do produtor rural, principalmente pelo aumento dos custos de controle, o que afeta negativamente os lucros da atividade agrícola (KOTCHEN, 1999; HOQUE et al., 2001). Para tanto, muitos destes estudos fazem uso de conhecimentos biológicos combinados aos conhecimentos econômicos para construir e validar um modelo de simulação que irá responder a questões importantes relacionadas a esse tema. Vários destes trabalhos abordam essas questões utilizando a metodologia da otimização dinâmica, incluindo a teoria de controle ótimo e programação dinâmica (KAMIEN e SCHWARTZ, 1991).

Identificam-se ainda trabalhos, como o de Lambert et. al. (2015), que utilizam otimização para modelagem via cadeia de Markov com o objetivo de determinar os fatores que mais contribuem para alterações nos custos do gerenciamento agrícola, após a identificação das pragas resistentes. Ou seja, analisa sobre quais fatores a resistência de pragas impacta diretamente e de forma mais intensa.

Ressalta-se que existem também outras formas de analisar o impacto econômico da resistência, dentre as quais pode-se citar a Análise de Viabilidade Econômica. Este método permite avaliar a viabilidade econômica da produção de uma determinada cultura em função de algumas condições específicas, como por exemplo, em função da evolução da resistência de

pragas-alvo de uma cultura *Bt*, como é o caso deste trabalho, buscando mostrar que, a medida em que a resistência de pragas avança sob a cultura *Bt*, aumenta o risco de redução da lucratividade do produtor rural com a atividade produtiva agrícola.

Existem diversos casos de uso desta metodologia para analisar a viabilidade econômica da produção de milho em função de várias outras condições, como por exemplo em função da adoção de áreas de refúgio como uma medida de manejo da resistência (ONSTAD; GUSE, 1999); em função de táticas de Manejo Integrado de Pragas (LIMA e PEIXOTO, 2017), dentre outros (ORLANDO *et al.*, 2015); em função da integração de um setor de armazenamento para estes grãos (VERGARA *et al.*, 2017) ou sob condições de irrigação com pivô central, (SILVA; SILVA, 2017). O que reforça a possibilidade de aplicação deste método para o estudo de caso do presente trabalho.

É importante ressaltar que, embora a metodologia de Otimização Dinâmica não seja a abordagem adotada nesta dissertação, segue-se uma breve revisão de alguns trabalhos que versam sobre o assunto, por acreditar-se na relevância de salientar aos leitores sobre as demais possibilidades metodológicas para examinar o impacto econômico da resistência, auxiliando na elaboração de futuros trabalhos.

Desta forma, a seguir, destacam-se alguns estudos que partem de modelos teóricos de otimização do lucro, tais como o de Kotchen (1999) e o de Hoque et al. (2001), tratados a seguir.

4.1.1 Modelos de Otimização

Os trabalhos a seguir mostram como a resistência de pragas afeta o nível de dano econômico, ou seja, a densidade de população de pragas resistentes capaz de causar prejuízos econômicos ao produtor rural, principalmente devido ao aumento dos custos com aplicações inseticidas.

Kotchen (1999) propôs um modelo de estratégias de gestão de pesticida incorporando os custos da resistência. O trabalho ressalta que o objetivo do manejo é maximizar o lucro do produtor por meio de um modelo de otimização, que maximiza o lucro da unidade produtiva em função das variáveis - frequência de aplicações de pesticidas, preço da cultura, a função de produção regional, o rendimento perdido pelas pragas, a densidade de pragas e a proporção das resistentes. Adequando uma análise feita por Carlson; Wetztein (1993), Kotchen (1999) propõe um novo modelo, primeiramente sem incluir o tratamento pesticida, e tendo como variável dependente o lucro do produtor. Nesse modelo, assume-se que os lucros são iguais às receitas

totais menos o custo de produção e os custos dos danos causados pelas pragas. Posteriormente Kotchen (1999) considera outro modelo, incluindo o tratamento pesticida, e no qual considera a porcentagem de redução de pragas após o tratamento pesticida e o custo regional desse tratamento, fundamentando o desenvolvimento de um modelo de otimização dinâmica com os custos da resistência ao longo do tempo.

No estudo de Kotchen (1999) obtém-se informações quanto à relação funcional entre a taxa de utilização de pesticidas, custo do tratamento químico e taxa de desenvolvimento da resistência.

À medida que aumenta a taxa de utilização de pesticidas (At), o rendimento da cultura aumenta a uma taxa decrescente, ou seja: $y'(At) > 0$ e $y''(At) < 0$. Supondo o investimento de capital anterior para aplicações de pesticidas, o custo do tratamento por período vai aumentar com o número de tratamentos, a uma velocidade constante, desde que haja apenas os custos variáveis, ou seja: $C'(At) > 0$ e $C''(At) = 0$. Por sua vez, aumentos na taxa de uso de pesticidas (At) vão levar a aumentos na resistência a uma taxa crescente, ou seja: $R'(At) > 0$ e $R''(At) > 0$.

O objetivo do trabalho de Kotchen (1999) foi mostrar que um bom manejo é capaz de maximizar o lucro no período de t selecionado, que é dado pela soma do valor presente da receita líquida no período atual (período 1) e futuro (período 2). Assim, Kotchen (1999) consegue verificar como a resistência afeta o lucro do produtor e evidenciar o impacto do desenvolvimento da resistência na economia. Observa-se também que as decisões de gestão relacionadas à frequência de aplicação do pesticida afetam a taxa de desenvolvimento de resistência e que o emprego de pesticidas gera tantos benefícios atuais e futuros quanto custos futuros. Os benefícios futuros consistem na redução de pragas enquanto os custos futuros, no aumento da taxa de resistência das pragas agrícolas.

Gorddard; Pannell; Hertzler (1995) investigam as opções de manejo do sistema agrícola na presença de plantas daninhas resistentes. Os autores citam que é grande a gama de opções para controle de plantas daninhas, com métodos de controle químico e não químico. Os autores apresentam uma aplicação teórica de um modelo de controle ótimo para selecionar a melhor combinação dessas duas categorias de medidas de controle na cultura do azevém, tendo em conta o *trade-off* entre os lucros de curto prazo e o nível do desenvolvimento da resistência a herbicidas a longo.

O objetivo do modelo de Gorddard; Pannell; Hertzler (1995) foi de maximizar o valor presente líquido do lucro agrícola, buscando determinar as dosagens químicas ideais e os níveis ideais de controle não químico. Os resultados indicam que, dada a ameaça de resistência, há

benefícios ao integrar uma combinação de medidas de controle não-químicas às medidas de controle químicas normalmente usadas. A estratégia ideal é encontrada ao adequar o uso de dosagens em níveis cada vez menores à medida em que a resistência se desenvolve, com aumentos compensatórios no nível de controle não químico. Concluíram, portanto, que a inclusão do controle não químico mostrou um grande impacto sobre a estratégia ótima de emprego do herbicida, na medida em que a resistência pode ser proveitosamente retardada.

O trabalho de Hoque et al. (2001), que estuda o problema do manejo da resistência a inseticidas ao nível da fazenda, na Austrália, na produção de algodão, adota abordagem semelhante a de Gorddard; Pannell; Hertzler (1995). Discute detalhadamente o tema a fim de encontrar as melhores alternativas de decisão para o manejo da resistência, e, considerando como modelos de simulação podem contribuir para isto. O desenvolvimento da análise avança por fases, sendo que a análise da programação dinâmica é especificada inicialmente para os resultados agrônômicos de rendimento, baseado no controle de populações de insetos, e inicialmente sem considerar os efeitos genéticos da resistência. Uma vez que esta formulação é satisfeita o componente de resistência é incluído.

O estudo de Hoque et al. (2001) observa como a população de praga resistentes (traça *Helicoverpa*) evolui ao longo do tempo, de acordo com as estratégias de manejo adotadas anualmente, as quais podem incluir controle químico (avaliado pelo número de aplicações e tipos de produtos químicos utilizados) e o uso de manejo de restolho e outras estratégias de MIP (uso de refúgios, por exemplo). Para avaliar as variáveis de estoque de populações resistentes, assume-se que a resistência é expressa em um único gene. Portanto, três variáveis podem ser usadas, a densidade de indivíduos (*H. armigera*) suscetíveis (SS); a densidade de heterozigotos (RS); e a densidade de resistentes (RR). O modelo entomológico é codificado para resistência a um único tipo de pesticida químico, ou seja, não considera a resistência a mais de um produto químico.

As estratégias de controle de pragas anuais incluem: o tipo de produto químico; o número de aplicações que influenciam a pressão de seleção; as estratégias adotadas no MIP; taxas de mortalidade de *Helicoverpa* que é afetada pelo histórico anterior de pulverização do campo, entre outros.

A razão para se usar os procedimentos de solução dinâmica (controle otimizado ou dinâmico de programação) é que o processo de transmissão de genes de resistência é 'dinâmico'. Isto é, pode-se explicar o nível de um estoque da população de pragas resistentes em qualquer ponto no tempo por um tipo particular de relação (uma equação diferencial chamada de equação

de estado ou de estoque de transição). Esta relação especifica que o nível de estoque e as decisões em relação ao período anterior, e outros fatores aleatórios climáticos determinam o nível do estoque em qualquer período futuro.

Para tanto, Hoque et al. (2001) adotam um modelo de dinâmica de populações das pragas que especifica a densidade (população) para cada tipo de genótipo, dadas as populações de *Helicoverpa*, uso de produtos químicos, mortalidade, níveis de reprodução e de imigração no período anterior. Especificam-se também alguns níveis iniciais no início do período de decisão quando $t = 0$. O problema consiste em maximizar a receita líquida do produtor, trazida a valores presentes, representada como o preço do algodão multiplicado pelo seu rendimento, subtraída dos custos de produção, sujeito às equações de dinâmica de populações. Esse trabalho aponta as melhores escolhas das decisões, em cada período de tempo, que maximizem a soma das receitas descontada dos custos oriundos de tais decisões.

Outro trabalho é o de Livingston; Carlson; Fackler (2000), em que se adota um modelo biodinâmico, determinístico não espacial, cujo objetivo foi determinar uma estratégia de refúgio para algodão que maximizasse o valor presente do lucro médio por unidade de área cultivada, considerando a restrição de níveis de resistência aceitáveis em horizontes de planejamento de 20, 30 ou 40 anos. A produtividade de algodão em áreas livres de pragas é considerada constante para o algodão *Bt* e não *Bt*. Reduções na produtividade e custos de tratamento com inseticidas são funções crescentes do nível de infestação de *H. zea* e *H. virescens* e do nível de resistência dessas pragas a piretróides. O autor considerou que a ligação entre o nível de resistência das pragas alvo à toxina *Bt* e o lucro do produtor é estabelecida pelas relações entre (i) taxa de sobrevivência anual das larvas; (ii) níveis de infestação das pragas e custos médios anuais de tratamento com piretróides; e (iii) taxas de sobrevivência, níveis de infestação e tratamento com piretróides e perdas anuais devido a danos de pragas. Nesse modelo, dito bioeconômico, o modelo genético que simula a evolução da resistência das pragas alvo à toxina *Bt* é associado a um modelo econômico de maximização de lucro sujeito a restrições ambientais.

Gutierrez; Regev; Shalit (1979) estudaram as consequências do desenvolvimento de resistência de gorgulho a pesticidas na cultura da alfafa, por meio de um modelo de otimização econômica. O modelo visou a maximização do lucro do produtor e para isto levou em consideração quatro componentes: a dinâmica populacional do gorgulho; a dinâmica da planta; a mortalidade de pragas induzida por pesticidas; e a evolução da resistência na população de gorgulhos. Conduziram dois estudos de caso – um buscou prever o melhor calendário padrão de aplicação de pesticidas (sem levar em consideração o desenvolvimento de resistência), e outro buscou uma política ótima de manejo de pragas (levando em consideração o

desenvolvimento de resistência na população de pragas, neste caso, com o nível de resistência e densidade de pragas conhecidas). A utilização ideal de pesticidas, os níveis de infestação, frequência do gene de resistência e os lucros ao longo do tempo foram derivados em cada caso. Com isto anotaram-se diferenças nos padrões de emprego de pesticidas e frequência de gene de resistência. O trabalho conclui que, ambos os casos de manejo foram “míopes”, pois ignoraram as implicações da resistência a longo prazo, que são complexas e difíceis de se analisar.

No estudo dos autores o problema econômico foi definido por uma função objetivo que buscou maximizar o lucro sujeito a restrições biológicas que representam o conjunto de interações biológicas entre planta, praga e pesticida; e um conjunto de parâmetros do sistema biológico. Escolhendo quantidades adequadas de pesticidas, o agricultor tenta maximizar o seu lucro dentro da safra/temporada. Contudo, o desenvolvimento da resistência, como resultado da exposição excessiva aos produtos químicos (a efetividade dos pesticidas diminui ao longo do tempo) faz com que os lucros diminuam a longo prazo (LUCK *et al.*, 1977). O modelo econômico examina as implicações da resistência a pesticidas, resolvendo uma série de problemas, por meio de uma programação de algoritmos não linear. As limitações do problema de otimização são colocadas na forma de equações em diferença, descrevendo a dinâmica do sistema biológico (planta-praga-pesticida).

Os resultados do trabalho mostram que, se os produtores devem maximizar os seus lucros realizando o controle de pragas, eles devem decidir não só por um controle econômico, mas também devem saber quando e qual a quantidade de pesticida deve ser aplicada. Gutierrez, Regev e Shalit (1979) citam que os modelos de simulação não são adequados para avaliar este tipo de problema, porque mesmo considerando uma situação das mais simples, como otimizar o momento de aplicação de pesticidas (zero ou alguma quantidade constante), durante 12 períodos, seriam necessárias 2^{12} simulações de computador.

4.1.2 Método de Análise de Viabilidade Econômica

Além do método de otimização a literatura também cita outros como o da Análise de Viabilidade Econômica como instrumento analítico para avaliar impactos

Em Lima; Peixoto (2017), por exemplo, foi feita uma análise de viabilidade econômica para a produção de milho híbrido AG-1051 em função de alternativas de Manejo Integrado de Pragas (MIP) e de práticas convencionais usadas na Chapada do Apodi, no município de Limoeiro do Norte, Ceará. Os dados foram coletados de um experimento de campo, onde se

obtiveram dados de custos de implantação, tratos culturais, produção, preço de venda para os dois sistemas de produção. A análise econômica consistiu na construção e comparação dos fluxos de caixa para esses dois sistemas de manejo de pragas. Com base nos indicadores de viabilidade econômica - relação Benefício-Custo (B/C), VPL, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM), verificou-se que o milho produzido sob MIP apresentou melhor desempenho do que o do sistema convencional.

Silva; Silva (2017) conduziram uma análise de viabilidade econômica para a implantação de milho, sob condições de irrigação com pivô central, no município de Santa Tereza, no Espírito Santo. Para tanto foram estimados dados de custos e receitas desde 2017 até 2025, com base na produtividade e custos obtidos a partir da colheita de 2016. A análise de viabilidade econômica foi feita por meio da montagem de um fluxo de caixa e da determinação do Payback, que consiste no tempo em que a empresa levaria para recuperar o capital inicial investido. Os resultados mostraram que a implantação da lavoura de milho sob irrigação no município de Santa Teresa é viável, tendo um Payback de 5 anos e 8 meses.

Em Vergara et al. (2017) aplicou-se uma análise de viabilidade econômico-financeira da produção de milho e soja por uma empresa de médio porte, com integração de um setor de armazenamento para estes grãos. Portanto o objetivo do estudo foi analisar a viabilidade econômica do projeto de investimento que visava a construção de um silo para armazenamento de milho e soja, com intuito de buscar por alternativas que reduzissem os custos de produção dessa empresa, de tal forma que essa se mantivesse competitiva no mercado diante da limitação de recursos e da acentuada concorrência. Dessa forma, realizou-se um estudo exploratório com uma abordagem qualitativa compreendendo aplicação de questionários. A análise teve como objetivo orçar os custos de aquisição das unidades, com capacidade de processamento adequada segundo as características do produtor rural, bem como verificar sua viabilidade econômico-financeira. Um mapeamento de processos, a pesquisa de mercado e a análise de cenários complementaram o estudo em questão.

Para a análise de viabilidade econômica, Vergara et al. (2017) adotaram os seguintes indicadores: o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Payback (PB), e o índice de Benefício-Custo (B/C) como medida de risco. Após a análise dos demonstrativos, verificou-se que o VPL do investimento apresentou um valor positivo, indicando que o projeto é viável, confirmando que a soma dos valores descontados dos ganhos é maior que o valor do investimento, ao final do financiamento. O valor determinado para a TIR foi superior ao rendimento de um Certificado de Depósito Bancário (CDB), com o qual os autores fizeram comparação. Porém, por se tratar de um investimento a longo prazo, a Taxa Mínima de

Atratividade (TMA) passa a ser uma questão estratégica a ser definida pelo produtor. Utilizando o método do Payback, verificou-se que o investimento inicial deve ser recuperado em dez anos, ainda no período de financiamento. O indicador Custo-benefício também apresentou valor positivo, a soma dos benefícios dividida pela soma dos custos gerou um valor acima de um, indicando a viabilidade do projeto.

Em Onstad; Guse (1999), foi feita uma análise de viabilidade econômica da produção de milho transgênico com adoção de refúgios não-transgênicos como uma forma de manejo da resistência para a broca europeia do milho (*Ostrinia nubilalis* (Hübner)). Nesse estudo foi simulada a dinâmica da população e a genética populacional desta praga e os danos ao milho em uma região hipotética contendo milho transgênico e não transgênico. O modelo pressupõe que o mesmo nível de refúgio para o manejo da resistência seja usado anualmente de 15 a 20 anos e que nenhuma praga europeia do milho imigre para a região durante o mesmo período. Quando se assume a mistura completa entre as gerações das pragas geradas nos blocos transgênicos e não transgênicos, ocorre redução significativa do dano causado pelas pragas nessa cultura. Para a maioria dos cenários sem declínio da eficiência da toxina durante a senescência do milho, um refúgio de 20% torna-se uma escolha econômica robusta baseada no valor atual. O milho não transgênico pode ser plantado em tiras (pelo menos 6 linhas por tira) dentro de um campo ou como blocos separados, mas adjacentes, para serem eficazes em atrasar a resistência e fornecer retornos econômicos em um nível de refúgio de 20%. Com o declínio da eficiência de toxina durante a senescência, os resultados do modelo se tornam sensíveis a vários parâmetros biológicos e pressupostos, estabelecendo um nível de refúgio de 10% capaz de oferecer uma escolha econômica robusta.

Orlando et al. (2015) realizaram uma análise de viabilidade econômica para avaliar a rentabilidade na produção de milho para processamento de pamonha. Por meio do acompanhamento dos custos de produção, realizaram cálculos de indicadores que permitiram a avaliação econômica e a determinação do risco utilizando, para isto, a análise de sensibilidade. Examinaram os fluxos de caixa dos recursos da produção, adotando também como indicadores o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e a taxa mínima de atratividade (TMA). A produção se mostrou rentável em todos os anos, pois garantiu a liquidação total de todos os custos de produção nas diferentes taxas de atratividade utilizadas, gerando um lucro satisfatório. Os custos levantados foram próximos aos encontrados nas propriedades da região. Além disso observou-se que na atividade existe risco devido às condições observadas no decorrer da produção, relativas à exigência nutricional e à suscetibilidade a pragas e doenças

da cultura, necessitando de um bom planejamento e condução da cultura, e, sobretudo, em uma cuidadosa tomada de decisão por parte do produtor.

4.2 Metodologia proposta e Dados

Este trabalho aplica o método de análise de viabilidade econômica no estudo do impacto econômico da resistência das pragas para o produtor rural. Para isto realizou-se um estudo de caso da análise de viabilidade econômica da produção do milho *Bt* sob condições de evolução da resistência de pragas a esta tecnologia, levando em consideração o risco por meio de técnicas auxiliares de simulação de Monte Carlo. Desta forma estes resultados buscam, além de evidenciar o impacto da resistência das pragas sobre o lucro do produtor rural, avaliar a importância econômica da resistência tendo em conta evitar a perda do valor da tecnologia *Bt* adotada pelos produtores de milho. Essa perda já se verifica em algumas regiões, evidenciada pela necessidade crescente de voltar a pulverizar a cultura com inseticidas a fim de controlar a *Spodoptera frugiperda* (popularmente conhecida como lagarta do cartucho).

4.2.1 Análise de Viabilidade Econômica

O estudo de caso dos impactos sobre a viabilidade econômica do milho *Bt* sob condições de evolução da resistência da *Spodoptera frugiperda* (lagarta do cartucho) é conduzido para dados da região de Rio Verde (GO), para a qual se dispõe de informações também do cultivo de milho convencional, favorecendo algumas comparações. A análise compreende o período de 2009/10 até 2015/16.

A análise de viabilidade econômica é um método que integra o rol de atividades desenvolvidas pela engenharia econômica, objetivando identificar os benefícios esperados de um determinado investimento em uma atividade produtiva, para compará-los com os investimentos e os custos associados ao mesmo, a fim de verificar a viabilidade de implantação dessa atividade. Para tanto a análise de viabilidade econômica de uma atividade produtiva ou empreendimento consiste em identificar todos os gastos envolvidos com o investimento inicial, os custos de produção e receitas geradas durante um determinado período de tempo, para assim montar-se o fluxo de caixa relativo a esses investimentos, custos e receitas e analisar os indicadores de viabilidade econômica para esse empreendimento ou atividade (VERAS, 2001).

Dentre as medidas de rentabilidade mais utilizadas em análise de viabilidade econômica de projetos de investimentos, estão o Método do Valor Presente Líquido (VPL), o Método da Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Coeficiente Benefício-Custo (B/C). Este trabalho propôs o uso dos indicadores econômicos VPL e Coeficiente B/C.

Adicionalmente, tendo em vista a complexidade do ambiente econômico sua inerente incerteza e a presença de variáveis de risco, adota-se também a técnica de Monte Carlo como auxiliar, a fim de incluir o risco nesta análise. A simulação de Monte Carlo foi desenvolvida por Hertz (1964), sendo um método eficaz para ser aplicado a fluxos de caixas e, assim, medir incertezas sobre variáveis sobre as quais não há controle e que são significantes na tomada de decisão (OLIVEIRA e MEDEIROS, 2012). Assim, o problema que se vislumbra é a necessidade de avaliar o risco do empreendimento da atividade produtiva do milho *Bt* sob condições de evolução de resistência na praga *Spodoptera frugiperda*.

De acordo com Frizzone et al. (2001) o risco é definido como uma estimativa do grau de incerteza que se tem com respeito à obtenção dos resultados futuros desejados. Dentre as diversas técnicas que possibilitam o tratamento do risco na análise de viabilidade econômica está a simulação de risco, aqui conduzida via simulação de Monte Carlo. Este método de simulação de dados permite calcular diferentes combinações possíveis das variáveis de entrada gerando-se distribuições de frequência de variáveis de saída, constituindo uma técnica de simulação que se baseia na comparação de números aleatórios com uma determinada função de probabilidade acumulada, ou seja, a partir de um número aleatório o método permite a geração de valores de determinada variável segundo sua função de probabilidade acumulada. Neste estudo de caso, os resultados desse método disponibilizaram as curvas de frequências dos valores simulados (MAYA, 2003), bem como a geração dos percentis de risco, os quais evidenciam a probabilidade de obtenção de níveis diferentes dos indicadores econômicos VPL e Coeficiente B/C (AMBROSI *et al.*, 2001), com o objetivo de mostrar que o risco de se ter prejuízo com a produção de milho *Bt* aumenta conforme a resistência de pragas evolui para esta cultura.

4.2.1.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O valor presente líquido (VPL) é o resultado da diferença entre os fluxos de caixa futuros descontados ao período zero (inicial) pelo custo de oportunidade do capital do projeto (taxa de desconto) e pelo investimento inicial (GITMAN, 2002).

De acordo com Gaslene; Fensterseifer; Lamb (1999), o VPL pode ser definido pela diferença entre as entradas líquidas de caixa no valor presente (VP) e o investimento inicial (I) necessário, levando em consideração a taxa de desconto (r), que fará os devidos descontos nos fluxos de caixa. Normalmente a taxa utilizada é definida de acordo com a expectativa de retorno prevista pelo investidor (CONTADOR, 2000).

A taxa de desconto (r) foi adotada, neste estudo, com base nas taxas de juros para crédito rural de custeio e comercialização agrícola. Agricultores normalmente tomam recursos para custeio e comercialização dos bancos e grupos de cooperativas integrantes do Sistema Nacional de Crédito Rural, a taxas que variaram de 9,5% a 11,25% ao ano nominais, na safra de 2016/17. Assim, o desconto de custos e benefícios futuros para o seu valor presente foi feito com a taxa máxima efetiva de desconto de 11,25% ao ano. A taxa de desconto real, utilizada neste trabalho, foi calculada a partir da taxa efetiva, considerando os efeitos inflacionários no período de 2016, de 6,5% ao ano. Conforme indica a eq. (4):

$$Taxa\ real = \frac{1 + taxa\ efetiva}{1 + taxa\ de\ inflação} - 1 = \frac{1 + 0,1125}{1 + 0,065} - 1 = 0,0446 \quad (4)$$

Com base no cálculo, chegou-se ao valor de desconto de 4,46% ao ano.

Pode-se observar que o VPL e a taxa de desconto são inversamente proporcionais, ou seja, à medida que a taxa de desconto se eleva, o valor presente líquido diminui.

O VPL é dado pela seguinte eq. (5):

$$\begin{aligned} VPL &= \sum_{t=0}^T VP_t - I_0 = \sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I_0 = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - I_0 \\ &= \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} - I_0 \end{aligned} \quad (5)$$

Na eq. (5): VPL é o valor presente líquido; VP é o valor presente; r é a taxa de desconto; I_0 é o investimento de capital inicial (na data zero); FC_t é o fluxo de caixa no período t ; B_t são os benefícios do projeto no período t ; C_t são os custos do projeto no período t ; t é o prazo de análise do projeto (anos).

Portanto o VPL é uma medida de quanto o projeto renderia, em valores atuais (ano 0), a mais que uma aplicação financeira, tomada como melhor alternativa disponível ao investidor.

O processo de tomada de decisão por meio do uso do VPL é feito ao comparar seu resultado ao valor de referência 0 (zero). Segundo Lapponi (2007) pode-se dizer que um VPL maior que zero, indica que o projeto remunera o capital investido acima da taxa de juros que mede o custo de oportunidade do capital e, dessa forma, o projeto é atrativo ao investidor.

No caso de um VPL menor que 0, o projeto deve ser descartado, pois indica que ele destruirá valor para a empresa, não recuperando o investimento inicial acima da taxa de juros “r”. Se $VPL = 0$ não é necessariamente uma condição de aceitação, pois o mesmo não destrói e não cria valor para a empresa, apesar de recuperar o custo inicial e remunerar o investidor com “r”. Nesta situação, Lapponi (2007) explica que o projeto pode ser aceito com a finalidade de manter a competitividade da empresa no mercado.

Portanto quanto maior o VPL, maior será a atratividade do projeto ou atividade produtiva, pois as entradas são maiores que as saídas de caixa. Considerando que as alternativas de investimento são analisadas com base na mesma taxa de desconto, a melhor opção será aquela que apresentar o maior VPL.

De acordo com Brigham (1989) e Buarque (1986) o VPL é um bom indicador para avaliação do mérito de um projeto, uma vez que ele representa, em valores atuais, o total dos recursos que permanecem em mãos da empresa ao final de toda a sua vida útil e é o único método que atende às três propriedades necessárias e suficientes para a condução das decisões corretas de seleção de projetos de investimento, pois considera todos os fluxos de caixa, considera o valor do dinheiro no tempo e seleciona, entre dois projetos mutuamente exclusivos, aquele que maximiza a riqueza dos proprietários do negócio.

4.2.1.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

O método da TIR, tal como o VPL, também é considerado um método exato, sendo obtida a partir da análise projetiva do fluxo de caixa e definida como a taxa de juros que torna nulo o VPL, ou seja, corresponde a taxa de juros (ou de desconto) onde as receitas e as despesas se igualam. Desta forma, a TIR representa, de certa forma, a taxa de retorno obtida pela empresa em seu investimento de capital no projeto (CONTADOR, 1981).

A taxa interna de desconto pode ser representada pela expressão:

$$VPL = 0 = \sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - I_0 \quad (6)$$

Na eq. (6) TIR é taxa interna de retorno; FC_t é o fluxo de caixa no período t ; t é o prazo de análise do projeto (anos); I_0 é o investimento inicial de capital (na data zero); B_t são os benefícios do projeto no período t ; C_t são os custos do projeto no período t .

Após o cálculo da TIR, no processo da tomada de decisão para aceitação ou não do empreendimento ou projeto é necessário realizar a comparação da TIR com a taxa de desconto (r) ou taxa mínima de atratividade (TMA), sendo aquele considerado rentável se a TIR for superior à TMA (GITMAN, 2002). Portanto, quanto maior a taxa interna de retorno do empreendimento, maior será o retorno esperado do capital.

Para fluxos de caixa convencionais, VPL é uma função decrescente da taxa de desconto (r), ou seja, quanto mais alta a taxa de desconto (r), menor será o VPL, e vice-versa. Então, se a taxa de desconto for superior à TIR, o VPL será negativo e, neste caso, o projeto deverá ser rejeitado; mas se a taxa de desconto for inferior à TIR, o VPL será positivo e o projeto deverá ser aceito. Esse conhecimento é utilizado para estabelecer uma regra simples de aceite ou rejeição dos projetos: dada uma taxa de desconto (neste caso denominada como taxa mínima de atratividade - TMA), o projeto deve ser aceito caso a sua TIR seja maior que a TMA e rejeitado, caso contrário (CONTADOR, 1981).

A resolução da eq. (6), segundo Faro (1972), consiste na determinação das raízes de um polinômio de grau “ T ”. Da álgebra sabe-se que todo polinômio de grau “ T ”, possui “ T ” raízes, incluindo as raízes complexas e múltiplas. O problema da aplicação do método da TIR consiste então em determinar a existência e garantir a unicidade de uma raiz que corresponda a uma taxa de juros no intervalo considerado. É esta condição que assegura a aplicabilidade do método.

Segundo Jean (1968), múltiplas taxas de retorno são possíveis somente quando fluxos de caixa negativos ocorrem no meio da vida útil do projeto, ou seja, em projetos que possuem fluxos de caixa não-convencionais. Para estes projetos, entretanto, há uma série de critérios que garantem a existência ou não de uma única taxa de juros real e positiva no intervalo considerado.

De acordo com Brigham (1989), o método da TIR possui algumas desvantagens, listadas a seguir:

- O método não permite a escolha entre dois projetos mutuamente exclusivos,
- A TIR pode não ser única caso o fluxo de benefícios líquidos mude de sinal mais de uma vez;
- Um projeto com TIR superior à TMA pode resultar em VPL negativo no caso de fluxos incomuns de benefícios líquidos;
- O método não permite comparar projetos.

Apesar dessas desvantagens, a TIR possui uma vantagem em relação ao VPL pois expressa os resultados em termos de taxa de juros cujo significado é mais facilmente assimilado do que o valor presente expresso em unidades monetárias. Neste trabalho, a TIR foi gerada no Microsoft Excel usando a função financeira IRR.

4.2.1.3 Coeficiente benefício-custo (B/C)

Para decidir sobre a viabilidade de um projeto é possível, além do VPL e TIR, analisar o coeficiente benefício-custo (B/C), que é dado pela eq. (7):

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (7)$$

O B/C é um indicador de eficiência econômico-financeira por sugerir o retorno dos investimentos a partir da relação entre a receita total e as despesas efetuadas para viabilizá-la, ou seja, indica quantas unidades de capital recebido são obtidas para cada unidade de capital investido (DOSSA *et al.*, 2000).

Se o $B/C > 1$, o projeto é viável. O B/C possui uma vantagem em relação ao VPL, pois oferece uma medida do quanto os benefícios superam os custos. A exemplo: um projeto com B/C de 1,3 gera 30% a mais de benefícios do que custos. Mas a B/C também possui uma desvantagem em relação ao VPL, que constitui a impossibilidade de escolher entre projetos mutuamente excludentes que possuam custos diferentes. Então, o projeto com B/C mais alto não é necessariamente aquele com VPL mais alto.

Se $B/C < 0$ significa que o projeto analisado produz benefícios líquidos negativos em magnitude superior ao custo de capital do projeto.

Apesar de suas limitações, o B/C pode complementar o critério do VPL quando há restrição de capital, caso em que os projetos devem ser realizados em ordem decrescente de B/C até atingir o limite da restrição de capital. Ainda assim, esta regra não é válida no caso de projetos mutuamente excludentes, caso em que a escolha deve recair sobre o conjunto de projetos cuja soma de VPL seja a maior possível, considerada a restrição de capital (PEARCE, ATKINSON E MOURATO, 2006).

4.2.1.4 Método de Monte Carlo (MMC) para análise de risco

O processo da análise de viabilidade econômica de uma atividade agrícola depende de um conjunto de informações que são geralmente incompletas e que podem apresentar significativo grau de imprecisão. Assim, de acordo com Blank; Tarquin (2008), haverá risco em uma atividade agrícola quando ocorrerem variações no estado futuro de variáveis relevantes, as quais afetarão o retorno esperado do investimento. Quando se conhecem os possíveis valores futuros das variáveis e suas probabilidades de ocorrência, diz que há risco; e, no caso em que não se dispõe de tais informações, há incerteza. Logo, conclui-se que o risco nada mais é do que uma incerteza que pode ser medida (OLIVEIRA, 1982).

No presente estudo, pode-se introduzir dois fatores de risco: o preço e a produtividade. O risco relacionado às oscilações de produtividade agrícola é o risco de produção, em que os principais fatores responsáveis são os problemas climáticos, as pragas e doenças e a disponibilidade de fatores de produção, que podem alterar o nível de produção dos diversos empreendimentos. Já o risco de mercado refere-se à variação da renda do produtor, em consequência das variações nos preços de mercado dos produtos, que se modificam com relativa frequência no ano agrícola. Pelo fato de a produção agrícola não ser instantânea, é comum que ocorram alterações nas expectativas de preços e, consequentemente, no retorno financeiro da atividade. Ao contrário do que ocorre com os preços dos produtos de outros setores da economia, os preços dos produtos do setor agrícola sofrem variação acentuada de janeiro a dezembro de cada ano.

Neste contexto, de posse do risco definido é permitido fazer análises econômicas, fazendo uso de simulações (CASAROTTO FILHO e KOPITKE, 2006).

A simulação de risco, feita pelo Método de Monte Carlo (MMC), na análise de viabilidade econômica traz benefícios, uma vez que facilita avaliar a chance de insucesso, com base nos resultados mais prováveis, além de possibilitar a avaliação da variação do seu retorno (OLIVEIRA, 1982). Neste trabalho, o MMC foi feito utilizando o software @Risk, sendo combinado com a engenharia econômica para obtenção da medida de valor presente líquido (VPL) e coeficiente benefício custo (B/C) considerando o risco envolvido nos dados de produtividade e preço do milho *Bt*.

De acordo com Costa; Azevedo (1996), o método de Monte Carlo (MMC) consiste em uma técnica de gerar informações, utilizando-se números aleatórios, através de simulação. Segundo Vose (1996) este método oferece inúmeras vantagens sobre os demais, tais como as listadas a seguir: 1) As distribuições de probabilidade das variáveis não precisam ter exatidão,

podendo ser utilizadas distribuições aproximadas; 2) As correlações e outras interdependências podem ser modeladas; 3) O nível de matemática envolvido na simulação não é muito alto; 4) Atualmente, existem *softwares* comerciais disponíveis que facilitam a simulação; 5) Níveis mais elevados de precisão podem ser obtidos pelo aumento do número de iterações, de acordo com a Lei dos Grandes Números; 6) Cálculos matemáticos complexos podem ser incluídos sem muita dificuldade; 7) Este método é amplamente reconhecido como uma técnica válida, de modo que seus resultados podem ser facilmente aceitos; 8) Alterações no modelo podem ser realizadas facilmente e de forma rápida.

De acordo com as etapas descritas por Hertz (1964), implementou-se a análise de risco econômica efetuada conjuntamente com a análise de viabilidade econômica da produção do milho *Bt*, seguindo os seguintes passos:

- 1) Estimou-se a média dos valores de cada variável. No caso do presente estudo foram estimadas as médias dos preços e da produtividade do milho *Bt*; observaram-se os valores mínimos e máximos de cada uma dessas variáveis ocorridos no período de tempo dos dados analisados; bem como as probabilidades de ocorrência de cada valor dentro de uma distribuição, definindo uma distribuição de probabilidades aproximada para cada fator de risco – preço e produtividade;
- 2) Foi selecionado para cada variável, a partir da distribuição de valores, um valor particular aleatório; posteriormente esses valores aleatórios das variáveis de risco foram combinados para o cálculo do valor presente líquido (VPL) e do coeficiente benefício custo (B/C) resultante dessa combinação, sendo anotado em planilha a parte.
- 3) Repetiu-se este processo n vezes para definir e avaliar as probabilidades de ocorrência de cada possível valor presente líquido e coeficiente benefício custo.

Os demais passos estão baseados nas repetições dos passos dois e três, quando o computador seleciona as sequências dos valores sorteados (passos 2) e calcula um novo VPL e coeficiente B/C e, assim, sucessivamente, até que milhares de valores presentes líquidos e coeficientes tenham sido calculados. No caso deste trabalho foram feitas 50.000 iterações.

A probabilidade de ocorrência para cada extensão de VPL e coeficiente B/C foi acumulada para se obter um perfil de risco para o investimento proposto.

Para definir a distribuição de probabilidades dos fatores de risco, geralmente, atribui-se uma distribuição teórica para a amostra de dados. Para tanto, uma das formas de proceder pode ser por meio do uso de um teste de aderência, que consiste em comparações de um conjunto de dados com distribuições específicas, de uma maneira estatística. Em cada teste adota-se a hipótese de que o ajuste é bom e calcula-se um teste estatístico para a comparação com um teste padrão, ou seja, uma distribuição definida. Dentre os testes de aderência citados pela literatura estão o Quiquadrado, Kolmogorov e Anderson Darling, em que quanto menor o valor do teste melhor a adequação dos dados à distribuição teórica.

Neste estudo de caso, todo o processo de identificação das funções de distribuição, bem como a geração de números aleatórios foi realizado pelo *software* @Risk, que se baseia nos testes de Komogorov e Qui-quadrado (χ^2) para dimensionar as melhores respostas, disponibilizando-as em uma lista. A partir dessa lista, o próprio pesquisador pode fazer os ajustes necessários, conforme sua necessidade.

A técnica de simulação é indicada quando as variáveis envolvidas com o problema apresentam distribuições contínuas de probabilidade (MOORE; WEATHERFORD, 2001; LUSTOSA; PONTE; DOMINAS, 2008). Assim, após estimar a distribuição de cada variável probabilística aleatória na análise, várias simulações são conduzidas, para as quais, em cada uma delas, geram-se valores aleatórios para o conjunto de variáveis de entrada e parâmetros do modelo que estão sujeitos a incertezas. Ressalta-se que esses valores aleatórios gerados seguem distribuições de probabilidade específicas identificadas ou estimadas previamente. Na simulação, a combinação dos resultados das variáveis simuladas gera um único valor do fluxo de caixa, e, ao se gerar um grande número de simulações, pode-se construir a distribuição para o valor do investimento que reflete a incerteza contida nas variáveis aleatórias. Desse modo, o conjunto de resultados produzidos pelas simulações pode ser analisado estatisticamente, fornecendo resultados em termos de probabilidade (COSTA e AZEVEDO, 1996).

4.2.1.5 Especificação dos dados, pressuposições e bases de cálculos

As informações necessárias para a modelagem das simulações foram cedidas pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – Cepea, as quais corresponderam aos dados em valores nominais de custo de produção e preço do milho segunda safra (safrinha), e dados de produtividade do milho segunda safra tanto para a tecnologia *Bt* quanto para a não *Bt* (convencional). Ressalta-se que a captação dos dados de custo realizada pelo Cepea ocorre por

meio da realização de “Painéis”⁷, cujo objetivo é identificar os sistemas de produção que podem ser considerados representativos ou típicos da região, e seus respectivos custos de produção.

Os Painéis estão disponíveis, em geral, para as regiões mais relevantes na produção nacional agropecuária, prevalecendo o sistema de produção e a combinação de atividade, terra e recursos mais comuns naquela região. Os pesquisadores do Cepea, técnicos e produtores da região determinam o preenchimento de uma planilha eletrônica que descreve detalhadamente a “propriedade típica” daquela região, discriminando o tamanho da propriedade (como área agrícola, área de pastagem, reserva legal e preservação permanente), número de máquinas, equipamentos, benfeitorias e mão de obra (fixa e temporária), preços médios das máquinas e implementos, rendimentos da produção agrícola e valor da venda da produção. São descritos também os passos do processo de produção na propriedade, como: coeficientes técnicos relacionados ao tempo de uso das máquinas e equipamentos e quantidade de insumos. A partir dessas informações, determinam-se os custos com insumos e operações mecânicas, custos fixos e também a receita bruta da propriedade, obtida a partir dos preços de comercialização apurados em outra frente de pesquisa do Cepea. Portanto, os dados coletados não se referem à uma fazenda específica de uma região, mas, sim, a valores modais dessa região.

Para fins deste estudo de caso, foi escolhida uma propriedade típica que representa as características modais das propriedades produtoras de milho da região de Rio Verde – GO. Essa escolha foi feita por essa região ser uma grande produtora desse grão e na qual há significativa adesão ao plantio de milho *Bt*, embora também se mantenha, ainda, o plantio de milho convencional, e por essa região já possuir alguns relatos em campo de agricultores sobre a ocorrência de falha de controle da tecnologia do milho *Bt* para a praga *S. frugiperda*.

As características da propriedade modal da região de Rio Verde (GO), com relação ao tamanho da área de produção, à produtividade, uso da área agrícola, valor de venda dos produtos, valores investidos em máquinas, implementos, benfeitorias e terra, e valor da terra declarado pelos participantes no painel estão descritas nas Tabelas do Anexo A.

No período de 2009/10 até 2015/16, em média, da área total da propriedade modal em questão: 62% corresponderam à área de cultivo, 21% à área arrendada, 13% área agrícola e 4% reserva legal e área de preservação permanente. Nas áreas de cultivo, o produtor planta principalmente as culturas de soja e milho, tanto *Bt* quanto convencional, predominando no

⁷ Informações detalhadas sobre a metodologia de painel do Cepea podem ser encontradas em Deblitz (1999) e De Zen; Peres (2002), Osaki et al. (2015), Ikeda, Osaki e Alves (2013), Alves *et al.* (2012).

milho o cultivo segundo safra em detrimento do milho verão. No entanto, verifica-se que o produtor vem aumentando o uso da tecnologia *Bt* tanto na cultura da soja, quanto na cultura do milho, o que pode ser confirmado pela observação do aumento das áreas de cultivo *Bt* na soja, passando de 270 ha em 2009/10 para 700 ha em 2015/16, e no milho segunda safra, passando de 300 ha em 2009/10 para 560 ha em 2015/16. No período de 2009/10 até 2015/16 o produtor plantou em média: 35% da área de cultivo agrícola com soja *Bt*, 11% com soja convencional; 23% com milho segunda safra *Bt*, 13% com milho segunda safra convencional e apenas 2% com milho verão *Bt*, 2% milho verão convencional.

A produtividade dos cultivos *Bt* e convencional não divergem entre si para o cultivo de milho segunda safra⁸, correspondendo à uma média de 95,7 sacas por ha, mas divergem da produtividade do milho de verão, o qual possui uma produtividade média superior de 140 sacas por ha, tanto para *Bt* quanto o convencional. Já a soja possui uma produtividade média de 52 sacas por ha para o convencional e tecnologia *Bt*.

A Tabela do anexo B mostra os dados nominais tanto dos custos fixos e variáveis de implantação da lavoura, quanto dos preço do milho segunda safra, bem como dados de produtividade do milho segunda safra, tanto para tecnologia *Bt* quanto para a convencional na região de Rio Verde (GO), disponibilizada pelo Cepea, compreendendo sete safras de produção de milho (2009/10 até 2015/16), os quais foram necessários para a elaboração da análise de viabilidade econômica da produção do milho em função da evolução da resistência de pragas, no período de 10 anos do estudo. Estes valores nominais foram trazidos a valores reais de dezembro de 2015 utilizando o índice IPA – DI (Índices de preço por atacado – Disponibilidade Interna). As Tabelas 4 e 5, a seguir, apresentam uma versão resumida da tabela do anexo B, agregando os custos com insumos e maquinários e outros custos de produção do milho *Bt* e convencional deixando evidenciadas as informações que são relevantes para o escopo deste estudo.

⁸ Nos dados de campo, coletados para essa propriedade típica de Rio Verde (GO) a produtividade do milho *Bt* e convencional foi considerada a mesma, pois os produtores da região de Rio Verde (GO) não colhem o grão, segregadamente, por tecnologia, principalmente pelo fato de que eles não recebem qualquer pagamento de prêmio pelo milho convencional em detrimento do milho geneticamente modificado.

No entanto, conforme consulta com os especialistas, Dr. Mauro Osaki e Dr. Celso Omoto, na prática não é isso que se observa, pois, a semente de milho convencional comercializada (não *Bt*) não possui o mesmo vigor que a semente *Bt*. Deste modo, os cultivos *Bt*, em geral, possuem maior produtividade quando comparados aos convencionais atualmente disponíveis, sendo esta mais uma justificativa pela preferência dos agricultores em adotar essa tecnologia, mesmo diante de situações de desenvolvimento da resistência das pragas que acabam por exigir aplicações extras de inseticidas para efetuar um controle complementar. Esse diferencial a mais da produtividade superior das variedades *Bt* em comparação à genética disponível, comercializada, para o milho convencional acaba compensando os maiores gastos com aplicações inseticidas.

Tabela 4 - Custos e renda bruta da produção do milho segunda safra *Bt*, trazidos a valores reais de dezembro de 2015, da região de Rio Verde – GO. Safras de 2009/10 a 2015/16.

	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Sementes	476,04	380,85	516,42	394,32	454,92	456,41	400,00
Inseticidas	32,15	0,00	12,39	14,34	51,52	33,40	35,68
Outros insumos	704,56	875,62	692,55	862,17	1024,48	926,87	757,59
Pulverização	17,28	0,00	2,85	11,14	4,89	5,56	2,75
Outras operações mecânicas	181,87	138,40	177,77	137,29	167,70	156,30	137,79
Operações terceirizadas	139,10	108,62	193,66	197,16	227,35	194,34	120,40
Mão de obra	143,42	160,82	183,08	173,14	98,56	62,31	52,51
Custo geral	356,33	283,18	256,78	0,00	105,49	66,01	58,08
Impostos	38,23	50,22	58,56	4,71	50,35	53,26	35,89
Seguro	18,30	17,63	17,54	19,04	20,11	20,69	16,54
Assistência técnica	33,89	33,29	35,57	35,79	40,59	0,00	30,13
Juros de capital de giro	12,51	158,27	161,99	125,12	127,46	158,57	160,02
Custo Operacional efetivo	2.153,68	2.182,80	2.281,79	1.974,20	2.373,43	2.133,71	1.915,37
Total de depreciação	142,26	105,48	139,01	114,05	148,21	127,38	108,68
Custo Operacional total	2.308,88	2.303,07	2.433,90	2.102,00	2.521,63	2.261,09	2.024,05
Juros sobre investimento	88,56	83,66	82,60	92,33	104,20	139,91	113,07
Oportunidade da terra	137,66	0,00	328,56	224,07	381,30	340,92	221,37
Custo Total	2.535,11	2.386,73	2.845,07	2.418,41	3.007,14	2.741,92	2.358,49
Preço médio	18,47	27,29	23,15	21,39	19,90	20,82	25,00
Produtividade	90,00	80,00	110,00	110,00	110,00	110,00	60,00
Renda Bruta	1.662,26	2.183,26	2.546,22	2.352,76	2.189,31	2.289,83	1.500,00

Fonte: Elaboração própria baseada nos dados do Cepea (2018).

Tabela 5 - Custos e renda bruta da produção do milho segunda safra convencional, trazidos a valores reais de dezembro de 2015, da região de Rio Verde – GO. Safras de 2009/10 a 2015/16.

	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Sementes	340,03	217,24	329,93	262,88	284,33	350,65	250,00
Inseticidas	125,81	40,60	74,07	92,31	85,98	71,24	56,08
Outros insumos	704,56	875,62	692,55	862,17	1024,48	936,45	780,27
Pulverização	23,04	0,00	2,85	11,14	7,34	5,56	2,75
Outras operações mecânicas	181,87	139,83	177,77	137,29	167,70	154,78	137,79
Operações terceirizadas	139,10	108,62	193,66	197,16	227,35	194,34	120,40
Mão de obra	160,67	163,57	183,08	173,14	101,75	61,57	50,92
Custo geral	356,33	283,18	256,78	0,00	105,49	66,01	58,08
Impostos	38,23	50,22	58,56	4,71	50,35	53,26	35,89
Seguro	18,30	17,63	17,54	19,04	20,11	20,69	16,54
Assistência técnica	33,50	30,91	33,08	34,72	37,98	0,00	27,96
Juros de capital de giro	227,41	148,59	152,04	121,38	119,66	153,51	149,62
Custo Operacional efetivo	2.348,86	2.053,38	2.146,22	1.915,92	2.232,52	2.068,06	1.794,29
Total de depreciação	144,68	106,14	139,01	114,05	149,27	126,31	108,68
Custo Operacional total	2.506,47	2.174,31	2.298,33	2.043,72	2.381,79	2.194,37	1.902,97
Juros sobre investimento	88,56	83,66	82,60	92,33	104,20	139,91	113,07
Oportunidade da terra	137,66	0,00	328,56	224,07	381,30	340,92	221,37
Custo Total	2.732,70	2.257,97	2.709,50	2.360,13	2.867,29	2.675,20	2.237,41
Preço médio	18,47	27,29	23,15	21,39	19,90	20,82	25,00
Produtividade	90,00	80,00	110,00	110,00	110,00	110,00	60,00
Renda Bruta	1.662,26	2.183,26	2.546,22	2.352,76	2.189,31	2.289,83	1.500,00

Fonte: Elaboração própria baseada nos dados do Cepea (2018).

Com relação à estrutura original de custo de produção agrícola do milho, ressalta-se que, de forma resumida, ela era desagregada por itens que compõem o Custo Operacional Efetivo (CO), o Custo Operacional Total (COT) e o Custo Total (CT), tomando como referência a descrição de Matsunaga *et al.* (1976) e o método de alocação de custo fixo discutido por Bornia (1995). No Custo Operacional Efetivo (CO) constam todos os itens considerados variáveis ou gastos diretos representados pelo dispêndio em dinheiro, tais como insumos (fertilizantes, sementes e defensivos agrícolas), operação mecânica (diesel e manutenção preventiva), mão-de-obra, serviço terceirizado, comercialização agrícola, transporte, despesa financeira, despesa com tributos de comercialização e despesa gerais. O Custo Operacional Total (COT) é formado pela soma do CO com a parcela dos custos indiretos representados pela depreciação de máquinas, implementos e benfeitorias e taxas associadas ao processo de produção. Por fim, o Custo Total (CT) é a soma do COT com o custo oportunidade de uso do capital e da terra.

Porém para fins deste trabalho, foram utilizados apenas o Custo Operacional Efetivo (CO), tendo como composição as seguintes variáveis, ou itens de custo, medidos em reais por hectare: gastos com insumos (principalmente sementes e inseticidas), operação mecânica

(principalmente pulverização), mão de obra, serviços terceirizados, comercialização agrícola, transporte, despesas financeiras, despesas com tributos de comercialização e despesas gerais. Foram considerados apenas os dados de CO, pois a propriedade típica a ser avaliada neste estudo de caso já está em funcionamento e, neste caso, o investimento inicial foi considerado igual a zero. Portanto, não foi necessário considerar toda a parcela dos custos indiretos fixos representados pela depreciação de máquinas, implementos e benfeitorias e taxas associadas ao processo de produção, nem o custo de oportunidade de uso do capital e da terra, que correspondem ao investimento inicial (ALVES; GOTTARDO, 2009 e CEPEA, 2018).

Para identificar como a resistência se reflete nos custos de produção são analisados principalmente os componentes de sementes, agroquímicos (principalmente inseticidas), máquinas (principalmente com o processo de pulverização) e mão de obra, para o milho *Bt* e convencional. A ressalva para estes itens específicos do custo deveu-se ao objetivo de destacar a parcela de impacto de cada um desses itens sobre o CO, em uma condição de produção com baixos níveis de pragas resistentes (sem ocorrência de danos econômicos) e numa condição de desenvolvimento considerável de pragas resistentes (com ocorrência de danos econômicos).

Os demais itens que compõem o custo operacional efetivo foram somados, tais como: custo com insumos (corretivos, sementes de forrageiras, fertilizantes, tratamento de sementes, herbicidas, inseticidas, fungicidas, adjuvante/reguladores de crescimento, fertilizantes foliares), custo com operações mecânicas (correção do solo, formação de forragens, preparo do solo, adubação pré-semeadura, semeadura/adubação, adubação de cobertura com N e K, outros tratos culturais e colheita), custo com operações terceirizadas, irrigação, custo geral, comercialização, e despesas gerais. Essa soma foi apresentada nas Tabelas 6 e 7 como “outros” itens do custo de produção.

Todos os itens que compõem o custo operacional efetivo, bem como os preços do milho foram trazidos a valores reais de dezembro de 2015 utilizando o IPA – DI (Índice de preço por atacado – Disponibilidade Interna), e são apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente, para milho *Bt* e convencional.

Tabela 6 - Custos da implantação da lavoura, preços e produtividade do milho *Bt* levantados em painel, em Rio Verde – GO - Valores reais de dezembro de 2015.

Custos Reais (R\$/ha)	Safrs (R\$/ha)							Média
	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	
Semente	476,04	380,85	516,42	394,32	454,92	456,41	400,00	439,85
Inseticida	32,15	0,00	12,39	14,34	51,52	33,40	35,68	25,64
Pulverização	17,28	0,00	2,85	11,14	4,89	5,56	2,75	6,35
Mão de obra	143,42	160,82	183,08	173,14	98,56	62,31	52,51	124,83
Outros	1.484,80	1.641,13	1.567,05	1.381,27	1.763,53	1.576,04	1.424,44	1.548,32
CO	2.153,68	2.182,80	2.281,79	1.974,20	2.373,43	2.133,71	1.915,37	2.145,00
Preço (R\$/ Saca 60Kg)	18,47	27,29	23,15	21,39	19,90	20,82	25,00	22,29
Produtividade (Sacas/ha)	90,00	80,00	110,00	110,00	110,00	110,00	60,00	95,71
Renda Bruta (R\$/ha)	1.662,26	2.183,26	2.546,22	2.352,76	2.189,31	2.289,83	1.500,00	2.103,38

Fonte: Elaborado a partir de dados do Cepea (2016).

Tabela 7 - Custos da implantação da lavoura, preços e produtividade do milho convencional levantados em painel, em Rio Verde – GO -Valores reais de dezembro de 2015.

Custos Reais (R\$/ha)	Safrs (R\$/ha)							Média
	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	
Semente	340,03	217,24	329,93	262,88	284,33	350,65	250,00	290,72
Inseticida	125,81	40,60	74,07	92,31	85,98	71,24	56,08	78,01
Pulverização	23,04	0,00	2,85	11,14	7,34	5,56	2,75	7,53
Mão de obra	160,67	163,57	183,08	173,14	101,75	61,57	50,92	127,81
Outros	1.699,31	1.631,97	1.556,28	1.376,46	1.753,12	1.579,04	1.434,55	1.575,82
CO	2.348,86	2.053,38	2.146,22	1.915,92	2.232,52	2.068,06	1.794,29	2.079,89
Preço (R\$/ Saca 60Kg)	18,47	27,29	23,15	21,39	19,90	20,82	25,00	22,29
Produtividade (Sacas/ha)	90,00	80,00	110,00	110,00	110,00	110,00	60,00	95,71
Renda Bruta (R\$/ha)	1.662,26	2.183,26	2.546,22	2.352,76	2.189,31	2.289,83	1.500,00	2.103,38

Fonte: Elaborado a partir de dados do Cepea (2016).

A produtividade e os preços do milho *Bt* e convencional, conforme mostram as Tabelas 6 e 7, foram considerados os mesmos⁹, pois os produtores não realizam a colheita do grão por tecnologia. A principal razão se deve ao não pagamento de prêmio pelo milho convencional em detrimento do milho geneticamente modificado.

Considerando que a elaboração do fluxo de caixa é a etapa fundamental para a análise da rentabilidade da atividade produtiva, a partir dos dados fornecidos pelo Cepea, elaborou-se um novo fluxo de caixa, neste caso com os dados dos itens que integram o CO e com os preços do milho deflacionados, montou-se um modelo para a simulação do VPL e B/C conforme

⁹ De acordo com entrevista com pesquisador responsável pelos levantamentos de campo Mauro Osaki, em 2018.

definido nas eq. (8) e (9). A TIR foi utilizada como índice econômico somente para comparar a viabilidade econômica estática do milho *Bt* com o convencional, para um período de 7 anos, com dados reais de preço e produtividade de cada safra desde 2009/10 até 2015/16. Portanto, não foi feita análise de risco para a TIR, eq. (10):

$$VPL = \sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I_0 = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (8)$$

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (9)$$

$$VPL = 0 = \sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - I_0 \quad (10)$$

Nas eq. (8), (9) e (10) *VPL* é o valor presente líquido; *TIR* é taxa interna de retorno; *B/C* é coeficiente benefício custo; *FC_t* é o fluxo de caixa esperado para o ano *t*, que varia de 0 até *T*; com *T* representando o prazo de vida útil do projeto ou empreendimento, no caso, 10 anos tal que $0 \leq T \leq 9$; *r* é a taxa de desconto considerada ou Taxa Mínima de Atratividade (*TMA*), neste trabalho foi considerada uma taxa de desconto igual a 4,46% ao ano, conforme indicado na eq. (4) apresentada anteriormente; *I₀* é o investimento de capital inicial (na data zero), no presente trabalho considerou-se *I₀* = 0, pois neste estudo de caso não houve investimento inicial do agricultor na atividade produtiva do milho; *B_t* são os benefícios do projeto no período *T*; *C_t* são os custos do projeto no período *T*.

A escolha do horizonte de tempo para a análise foi de 10 anos, já que há indícios de que este é o tempo de vida eficiente da tecnologia *Bt*, de acordo com relatos reais de agricultores a campo. Pressupõe-se, neste trabalho que, após esse período de tempo essa tecnologia começa a expressar queda de eficiência, pelo surgimento de resistência de pragas ao cultivo *Bt*.

Com relação ao benefício do projeto (*B_t*), este é calculado pela multiplicação da produtividade (*P_t*) da cultura no período *T*, pelo preço de mercado do milho (*PR_t*) no período *T*. O benefício do projeto (*B_t*) foi calculado para os dados do milho *Bt* e convencional, tal como mostrado na eq. (11):

$$B_t = P_t * PR_t \quad (11)$$

A eq. 12 indica como foi calculado o custo do projeto no período T (CO_t), que corresponde ao custo operacional efetivo da produção do milho, constituído pela soma do custo operacional de sementes (COS_t); custo operacional de inseticidas (COI_t); custo operacional de operações mecânicas (COM_t); custo operacional de mão-de-obra para milho Bt ($COMB_t$), sendo que os outros itens do custo operacional efetivo são somados, sendo apresentados de uma forma única (CSO_t). O custo operacional efetivo do projeto (CO_t) foi calculado para os dados do milho Bt e convencional, conforme abaixo:

$$CO_t = COS_t + COI_t + COM_t + COMB_t + CSO_t \quad (12)$$

No entanto, para calcular o risco e o retorno da atividade é necessário simular um grande número de cenários para as variáveis aleatórias componentes das contas do fluxo de caixa da atividade. Dessa forma, obtém-se a distribuição de frequência dos retornos esperados para o investimento desejado, ou seja, a distribuição de frequência do VPL e B/C. Assim, pressupondo por observação da realidade prática no campo, que os resultados das contas do fluxo de caixa da atividade dependem das oscilações nas variáveis aleatórias de risco que as afetam, destacadamente: preço e produtividade do milho, rodou-se o modelo de simulação de Monte Carlo, com 50.000 iterações, por meio do *software* @Risk.

Adicionalmente, para estabelecer os cenários da análise de viabilidade econômica da produção de milho de Bt em função da evolução da resistência de pragas no presente estudo, conforme tratado no item seguinte, foi necessário coletar dos painéis do Cepea, dados que fornecessem informações de como se deu a evolução da frequência de pragas (*Spodoptera frugiperda*) resistentes, nas propriedades modais levantadas em Rio de Verde (GO). Neste caso, considerou-se que, conforme a definição prática da resistência, a mesma começa a se expressar quando se atinge uma frequência de pragas resistentes capaz de causar danos econômicos significativos ao agricultor, como resposta a uma falha de controle das pragas pela tecnologia Bt .

Esses danos econômicos são expressos pelo aumento no custo de produção, devido à necessidade de maior controle químico (uso de inseticidas e de maquinário para pulverização) para o controle das pragas resistentes. Para tanto, observou-se o número de aplicações inseticidas para lagarta *S. frugiperda* realizados em cada safra, desde 2009/10 até 2015/16, nas propriedades modais levantadas em Rio Verde (GO), como uma medida que expressa a evolução da eficiência da cultura do milho Bt no controle dessas lagartas. Ou seja, à medida

que se observa aumento na quantidade de aplicações inseticidas na cultura *Bt* evidencia-se a queda na eficiência dessa tecnologia até atingir a falha de controle de lagartas, como indício de evolução da frequência de pragas resistentes.

Os números de aplicações inseticidas realizadas para lagarta *S. frugiperda* nas propriedades modais levantadas para Rio Verde (GO) observados em cada ano safra são descritos na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 - Número de aplicações inseticidas realizadas para lagarta no milho *Bt* e convencional, na propriedade modal de Rio Verde (GO) em cada ano safra desde 2009/10 até 2015/16.

	Nº de aplicações inseticidas observadas no milho <i>Bt</i>	Nº de aplicações inseticidas observadas no milho convencional
2009/10	1	4
2010/11	0	3
2011/12	0	3
2012/13	1	3
2013/14	3	6
2014/15	2	4
2015/16	1	2
Nº médio de aplicações	1,0	3,5

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Cepea (2018).

Neste trabalho o número de aplicações inseticidas foi obtido pela contagem das entradas de maquinários necessárias para pulverização de inseticidas no milho *Bt* e convencional na propriedade modal de Rio Verde (GO). De acordo com a Tabela 8 observou-se que o produtor realiza em média 3 aplicações inseticidas no milho convencional. Assim, considerando que, a falha de controle da tecnologia *Bt* pode ser constatada quando a praga resistente causa prejuízos econômicos semelhantes aqueles causados por insetos suscetíveis a uma variedade de cultura convencional. Quando o produtor tem a necessidade de realizar 3 pulverizações no milho *Bt*, já há indícios de falha de controle ¹⁰ por parte da tecnologia do milho *Bt* contra as lagartas *S. frugiperda*.

Analisando os dados, na Figura 12, observou-se um gradual aumento nos custos operacionais efetivos para produção do milho *Bt* ao longo das safras de 2009/10 até 2015/16, bem como um aumento nos custos com inseticidas e maquinário para pulverização. Notou-se

¹⁰ De acordo com informações do pesquisador de entomologia da ESALQ, Dr. Celso Omoto, o custo de 2 a 3 aplicações inseticidas já constitui um custo da resistência pois, em tese, a cultura *Bt* não deveria necessitar de aplicações inseticidas adicionais para o controle das pragas alvo da tecnologia *Bt*.

ainda uma correspondência entre aumento no número de aplicações e o dos custos operacionais efetivos de produção de milho, tanto para o convencional quanto para o *Bt*, devido majoritariamente aos correspondentes incrementos no custo com inseticidas e pulverização, principalmente nas safras de 2013/14 e 2014/15.

Figura 12 - Comparativo entre custos de produção do milho *Bt* e Convencional, entre as safras de 2009/10 até 2015/16.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Cepea (2018).

Nota: Conv.: Cultura Convencional; *Bt*: Cultura *Bt*.

Portanto, por meio dessas análises, averiguou-se que um possível limiar do número de aplicações inseticidas a partir do qual, eventualmente, começa a ocorrer danos econômicos para o produtor rural, tornando a cultura *Bt* economicamente mais cara que a cultura de milho convencional, corresponderia a 3 aplicações. Ressalta-se que nas safras de 2010/11 e 2011/12, mesmo não havendo registro de aplicações inseticidas para lagarta no milho *Bt*, observa-se que o custo operacional efetivo do milho *Bt* foi superior ao do convencional, principalmente devido aos gastos com a semente *Bt* superiores aos com a semente convencional.

4.2.1.6 Cenários adotados e base de comparação

Para avaliar os efeitos da resistência de *Spodoptera frugiperda* (lagarta do cartucho) na viabilidade econômica da produção de milho *Bt* foram estabelecidos dois cenários:

- Cenário A - considera uma área agrícola de produção de milho *Bt*, com frequência de lagartas resistentes abaixo do nível de dano econômico; assim, consiste no cenário base para a identificação das perdas mínimas, pois leva em consideração que a tecnologia *Bt* tem máxima eficiência, e que a área tem baixos custos com aplicação de inseticida. Este é um cenário teórico, para fins de isolar os efeitos da evolução da resistência.

- Cenário B – considera uma área agrícola de produção de milho *Bt*, onde se constata a gradual evolução da frequência de lagartas resistentes até atingir a falha de controle do cultivo *Bt*, capaz de causar danos econômicos significativos para o produtor rural. Leva em consideração que a área tem maiores custos com aplicação inseticida e com as correspondentes atividades de maquinários para pulverização, quando comparado com o cenário A, devido à evolução da resistência das pragas. Busca ressaltar os impactos negativos que a evolução da resistência causa na viabilidade econômica do produtor rural.

Assim, no cenário B, simulou-se o desenvolvimento da frequência de pragas resistentes à tecnologia *Bt* pelo aumento gradual do número de aplicações inseticidas contra *Spodoptera frugiperda* nos cultivos de milho *Bt*. Assume-se que, a resistência é verificada quando o número de aplicações inseticidas para o cultivo *Bt* torna-se igual ou maior que o de aplicações inseticidas no milho convencional, indicando falha de controle das lagartas *S. frugiperda* pela tecnologia do milho *Bt*. Desta forma, pretende-se captar o impacto econômico da evolução da resistência das pragas sobre o custo de produção do milho *Bt*, com consequente impacto negativo na rentabilidade do cultivo *Bt*.

Para tanto foram realizadas três simulações, no cenário B, conforme ilustradas na Figura 13. Na primeira (cenário 1B) buscou-se verificar a porcentagem de risco de redução na rentabilidade do produtor com o cultivo de milho *Bt*, supondo que o mesmo realize 01 aplicação inseticida adicional. A segunda simulação (cenário 2B) buscou verificar o risco de redução na rentabilidade do produtor com o cultivo de milho *Bt*, supondo que o mesmo realize 02 aplicações inseticidas adicionais; e a terceira simulação (cenário 3B), igualmente, para a situação de 03 aplicações inseticidas adicionais.

Figura 13 - Ilustração dos cenários simulados para análise dos efeitos da evolução da resistência de pragas na rentabilidade da produção de um cultivo *Bt*.

Fonte: Elaboração própria.

O fluxo de caixa para cada cenário acima contém os dados reais de custos e dados de produtividade e preços, simulados por meio do método de Monte Carlo, baseados em um intervalo de valores máximos e mínimos realmente observados no cultivo de milho *Bt* da propriedade modal de Rio Verde (GO), para essas duas variáveis de risco.

Para avaliar o efeito da evolução da resistência de pragas na economia do produtor rural, inicialmente procurou-se identificar os itens do custo operacional efetivo que tinham maior peso nos anos safra em que foram realizadas mais aplicações inseticidas devido ao aumento na frequência de indivíduos resistentes da lagarta *S. frugiperda*. Esses itens corresponderam ao custo com inseticidas e maquinário para pulverização. Para tanto, em cada cenário utilizou-se um valor médio dos custos com inseticidas e operações mecânicas para pulverização, dos anos safra que apresentaram o mesmo número de aplicações inseticidas do cenário em questão. Esse número de aplicações do tratamento fitossanitário foi mantido constante ao longo do período de projeção adotado, de 10 anos. Neste caso, os dados de custo com inseticidas (R\$ 0,00 por hectare) e pulverização (R\$ 0,00 por hectare) utilizados para o cenário A corresponderam à média dos dados dos anos safra que apresentaram 0 aplicações inseticidas para lagarta no milho *Bt* (2010/11 e 2011/12). Para o cenário 1B, foi utilizada a média do custo com inseticida (R\$ 27,39 por hectare) e pulverização (R\$ 10,39 por hectare)

dos anos safra que apresentaram apenas 1 aplicação inseticida para lagarta no milho *Bt* (2009/10, 2012/13 e 2015/16). Para o cenário 2B, foram utilizados o custo com inseticida (R\$ 33,40 por hectare) e com a pulverização (R\$ 5,56 por hectare) da safra que registrou, conforme os levantamentos de campo do Cepea, 2 aplicações inseticidas para lagarta no milho *Bt* (2014/15). Da mesma forma, assumiu-se um custo com inseticida (R\$ 51,52 por hectare) e com pulverização (R\$ 4,890 por hectare) do ano que apresentou 3 aplicações inseticidas para lagarta no milho *Bt* (2013/14) para simular o fluxo de caixa do Cenário 3B. Estes dados estão resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de custo com inseticida e maquinário para pulverização utilizados no fluxo de caixa de cada cenário, A, 1B, 2B e 3B para a análise de risco (10 anos) da produção de milho *Bt*, em propriedades modais, Rio Verde (GO). Valores reais para 2015.

	Cenário A	Cenário 1B	Cenário 2B	Cenário 3B
	Média das safras 2010/11 e 2011/12	Média das safras 2009/10, 2012/13 e 2015/16	Dados da safra 2014/15	Dados da safra 2013/14
Inseticida (R\$/ha)	0,00	27,39	33,40	51,52
Maquinário (Pulverização) (R\$/ha)	0,00	10,39	5,56	4,89

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados de painéis Cepea (2018).

Para isolar somente o efeito do aumento dos custos com inseticidas e maquinário para pulverização em cada cenário, foram mantidos, *ceteris paribus*, os demais custos operacionais. Para tanto foram considerados dados médios de custos com semente (R\$ 440,00 por hectare), mão de obra (R\$ 124,83 por hectare) e a soma dos demais itens de despesa que compõem o custo operacional efetivo (R\$ 1.548,32 por hectare) da safra de 2009/10 até 2015/16, mantidos constantes ao longo dos 10 anos de estudo em todos os cenários.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e discute os resultados do estudo. Abrange uma avaliação geral da produção de milho segunda safra e de como a renda e os custos de produção do milho evoluíram para a região de Rio Verde (GO) ao longo dos últimos anos, em função da introdução da tecnologia *Bt* e do surgimento da resistência. Na análise, há destaque para a evolução da despesa com pesticidas, bem como para a análise de viabilidade econômica da produção do milho *Bt* em função da evolução da resistência de *Spodoptera frugiperda* (lagarta do cartucho) a essa tecnologia transgênica.

5.1 Avaliação geral das safras de milho safrinha em Rio Verde (GO)

No Brasil o milho pode ser cultivado, sem irrigação em duas safras, caracterizando a divisão da produção em duas épocas distintas de plantio: os plantios de verão, ou primeira safra, que são realizados na época tradicional, durante o período chuvoso, que varia de fins de agosto na região Sul até outubro/novembro no Sudeste e Centro Oeste (no Nordeste este período ocorre no início do ano), e os plantios de segunda safra, referente ao milho de sequeiro cultivado extemporaneamente, de janeiro a abril, quase sempre depois da soja precoce, predominantemente na região Centro-Oeste e nos estados do Paraná e São Paulo.

Embora a prática de realizar a segunda safra do milho seja recente, os totais de produção aumentam de forma exponencial, demonstrando a sua importância para a produção nacional e consequentemente para o cenário econômico (TSUNECHIRO, AZARIAS MARTINS e MIURA, 2013). De acordo com dados da CONAB (2018) na safra de 2016/17, por exemplo, a produção nacional total de milho foi de 96 milhões de toneladas, sendo a segunda safra (67,30 milhões de toneladas) superior à primeira (30,40 milhões de toneladas). Esse padrão vem ocorrendo em todas as safras desde 2012, quando a segunda safra se tornou mais expressiva. O mesmo verifica-se com a área de plantio, em que, dos 17,60 milhões de hectares de área total do milho plantado em 2016/17, cerca de 5,40 milhões destinaram-se ao milho de primeira safra em detrimento dos 12,10 milhões de hectares para o milho de segunda safra.

Essas informações buscam justificar a importância que se deu neste trabalho para os dados de produção do milho de segunda safra.

A região Centro-Oeste, especificamente o Estado de Goiás, onde se localiza o município de Rio Verde, também mereceu destaque neste trabalho, pois de acordo com os dados da CONAB (2018), esta é uma das regiões de maior produção de milho, principalmente milho de segunda safra. Em 2016/17, por exemplo, dos 17,60 milhões de hectares de área total de milho, 8 milhões foram produzidos somente na região Centro-Oeste, e destes, 1,50 milhão de hectares foram plantados em Goiás, sendo 1,20 milhão de segunda safra. Quanto à produção total nacional, dos 96 milhões de toneladas produzidas, 48 milhões de toneladas foram somente na região Centro-Oeste, das quais, 9,60 milhões representam a produção de Goiás, com 7 milhões de toneladas de milho segunda safra.

De acordo com dados de 2013 do IBGE, o município de Rio Verde possui grande participação na produção de milho segunda safra de Goiás, respondendo por 25% da área e 19,7% da produção nesse estado.

Para que a cultura do milho tenha um bom desenvolvimento e boa produtividade é preciso ter condições climáticas ideais de temperatura e de disponibilidade de água no solo (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000), sendo que quando esse grão é cultivado fora de época, a chamada segunda safra, a cultura fica mais suscetível às variabilidades do clima.

De acordo com o estudo de Guerra; Silva; Francischini (2013) dentre os fatores de riscos que afetam o desempenho do milho safrinha em Goiás, o estresse hídrico é apontado pelos relatos a campo de produtores como o principal fator limitante para o rendimento da cultura. Os agricultores apontam que a ocorrência de pragas, doenças e a fertilidade do solo são, nessa ordem, os outros fatores mais limitantes para obtenção de maiores rendimentos. Daí a necessidade de o produtor planejar a implantação do milho safrinha para se ter maior lucratividade com a cultura.

Neste contexto, nos parágrafos a seguir descrevem-se as variações de produtividade registradas pelo levantamento do Cepea, a partir dos dados de painéis das propriedades modais de Rio Verde (GO), nas safras de 2009/10 até 2015/16, decorrentes principalmente das oscilações climáticas de cada ano safra (Figura 15). Os dados permitem, ainda, algumas inferências sobre a influência da oferta do milho, decorrente de uma maior ou menor disponibilidade do produto conforme sua produtividade, nos preços de milho em cada ano safra (Figura 14 e Tabela 10). Com isso, pretende-se avaliar a variação na renda obtida pelo produtor ao longo desse período.

Os preços de comercialização do milho são distintos entre as regiões do Brasil. A região Sul, é a maior consumidora e segunda maior produtora de milho, ocorrendo um relativo equilíbrio entre produção e consumo; o mesmo ocorre na região Sudeste, e ambas as regiões,

acabam por apresentar preços reais de comercialização por saca de 60 Kg próximos à média do Brasil na safra. A região Centro-Oeste, no entanto, embora seja a maior produtora de milho do país, por apresentar baixa demanda por milho acaba registrando preços de comercialização inferiores à média nacional, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Evolução dos preços reais médios da saca de milho 60 Kg nos estados brasileiros – 2009 até 2016.

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Agrolink (2018).

Cabe mencionar, como curiosidade que, em decorrência do baixo consumo local do milho no Centro-Oeste, o cereal precisa ser escoado para outras regiões do país ou mesmo para o exterior. Por esse motivo, as exportações brasileiras consistem principalmente de milho safrinha, que é predominante no Centro-Oeste, além do fato de que na safra verão a soja tem a preferência nos portos brasileiros.

Figura 15 - Evolução da produtividade e dos preços do milho segunda safra em Rio Verde (GO), para o milho *Bt* e convencional, desde 2009/10 até 2015/16.

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do Cepea (2018).

Nota: Eixo principal em R\$ por saca de 60 Kg de milho para preço¹¹ médio ponderado por safra e sacas por hectare de milho safrinha para produtividade. Eixo secundário em R\$ por hectare para renda bruta.

¹¹ De acordo com os painéis do Cepea, não houve registro de diferencial na produtividade do milho safrinha *Bt* e convencional. O mesmo é observado para os preços reais médios ponderados por safra, os quais são levantados para a região sem a distinção de grãos provenientes da tecnologia *Bt* ou convencional.

Tabela 10 - Valores modais de produtividade e médias da região de Rio Verde (GO) para preços reais ponderados por safra e receita bruta média - 2009/10 até 2015/16.

Safra	Preço médio	Produtividade	Renda bruta	Características climáticas obtidas do Levanto da safra brasileira de grãos da CONAB
2009/10	18,47	90,00	1.662,26	O desenvolvimento da lavoura de milho safrinha transcorreu normalmente quando consideradas as médias históricas para essa época do ano. No entanto, existiram situações pontuais de períodos de deficiência hídrica, principalmente em Goiás, que sinalizaram perda de produtividade, principalmente naquelas áreas que estavam na fase de floração e granação, o que não chegou a caracterizar significativa alteração do quadro de produtividade normalmente observado.
2010/11	27,29	80,00	2.183,25	Por consequência do atraso na colheita da soja e o excesso de chuvas durante o período de semeadura, boa parte da lavoura do milho segunda safra foi estabelecida fora do período recomendado, comprometendo sua produtividade. Para o milho segunda safra que teve a semeadura realizada dentro do período ideal recomendado, o clima foi normal, mas, o período de chuvas não se prolongou como esperado pelos produtores e, com isso, as lavouras semeadas fora da janela enfrentaram adversidades climáticas, embora normais para a época do ano. Essa falta de umidade prejudicou a cultura em Goiás, diminuindo sua produtividade. Com a menor oferta de milho segunda safra os preços aumentaram.
2011/12	23,14	110,00	2.546,21	O desenvolvimento das lavouras de milho segunda safra foi muito favorecido pelo clima, de uma forma geral no estado de Goiás, ocasionando um máximo da produtividade verificada na Região de Rio Verde (GO) desde 2009/10 até 2015/16.
2012/13	21,38	110,00	2.352,75	
2013/14	19,90	110,00	2.189,30	
2014/15	20,81	110,00	2.289,82	
2015/16	25,00	60,00	1.500,00	Nessa safra o clima foi o grande fator limitante da cultura e responsável pelo baixo desempenho da lavoura em todo o país, inclusive no estado de Goiás, causando forte impacto na produção. A produtividade apresentou a maior redução nos últimos dez anos, chegando a 60 sacas/ha. Em Goiás, em função da forte estiagem, várias áreas foram atacadas pela lagarta do cartucho, coincidindo com um menor número de aplicações dos defensivos agrícolas realizados habitualmente pelo produtor por considerar nessa altura, pouco compensatório o tratamento fitossanitário. A quebra da produção levou a um aumento do preço do milho. Embora o preço tenha aumentado com relação à safra anterior. Contudo, essa elevação dos preços não compensou a redução na produtividade, de modo que se registrou uma queda na renda média bruta do milho de segunda safra, a mais baixa, em valores reais, consideradas as safras anteriores recentes.

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de preço, produtividade e renda bruta coletado do Cepea (2018) e características climáticas obtidas dos levantamentos de safra de grão da CONAB (2018).

5.2 Avaliação da evolução dos custos de produção do milho segunda safra em Rio Verde (GO)

Na Tabela de custos apresentada no Anexo B, constam os custos operacionais e totais, assim como a receita bruta, da produção de milho convencional e *Bt* na região de Rio Verde (GO), conforme dados dos levantamentos de campo do Cepea, já transformados em valores reais para dezembro de 2015.

Na Figura 16 constam as participações dos itens que compõem a estrutura dos custos agrícolas da produção de milho convencional e do milho *Bt*, para as propriedades modais, levantadas pelo Cepea para a praça de Rio Verde (GO). As parcelas dos itens de custos foram calculadas em proporções dos custos reais. Os dados indicam que os insumos constituem a parcela que têm maior representatividade no custo operacional efetivo, tanto para a segunda safra do milho convencional quanto para o *Bt*.

Observa-se que os custos com insumos foram aqueles que aumentaram proporcionalmente mais, principalmente após a safra de 2012/13, ao mesmo tempo em que os custos gerais perderam espaço no custo operacional efetivo.

Figura 16 - Participação anual dos itens do Custo Operacional Efetivo para produção de milho *Bt* e convencional de segunda safra no município de Rio Verde (GO), Safras 2007/08 a 2015/16

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Cepea (2018).

Nota: Conv.: Cultura Convencional; *Bt*: Cultura *Bt*.

Em linhas gerais, nota-se que os custos com insumos, operações mecânicas, mão de obra, operações terceirizadas e custos gerais são os que merecem maior atenção dos produtores, tanto para milho *Bt* quanto para convencional. É possível notar ainda um aumento pequeno ou manutenção de elevados gastos com insumos em relação aos demais itens, para a produção de milho *Bt* e convencional, ao longo das safras, desde 2009/10, exceto na safra de 2015/16, em que, conforme mencionado na seção anterior, o produtor considerou pouco compensatório despendar com insumos diante da evidência de quebra de safra do milho safrinha devido à ocorrência de forte estiagem nesse ano.

Desagregando o componente de gastos com insumos, é possível notar a grande participação da semente nos custos tanto para a produção de milho *Bt* quanto para o convencional, conforme mostra a Figura 17. No período de 2009/10 a 2015/16, em Rio Verde (GO) a semente convencional representou em média 20% do custo real com insumos para a produção do milho de segunda safra e a semente geneticamente *Bt* representou em média 29% do custo real com insumos.

Figura 17 - Percentual dos gastos reais anuais com insumos para produção de milho segunda safra, convencional e *Bt*, na região de Rio Verde (GO).

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Cepea (2018).

Nota: Conv.: Cultura Convencional; *Bt*: Cultura *Bt*.

Ao analisar, especificamente, o grupo de insumos, nos últimos anos (Figura 17) observa-se uma mudança significativa na estrutura de custo de produção de milho segunda safra, com a introdução da tecnologia *Bt*, em 2007, no Brasil. De acordo com Osaki; Alves; Barros (2015) a elevação de gastos com sementes transgênicas resistentes ao ataque de lagartas e o benefício econômico da redução do uso de inseticidas nas lavouras de milho foram as principais alterações observadas nos anos safras de 2009/10 a 2012/13.

De acordo com Pereira Duarte (2015) houve grande difusão dos híbridos transgênicos de milho *Bt* após sua liberação, sendo que atualmente estes são empregados em, aproximadamente, 90% da área de milho segunda safra, no Brasil. Uma das razões para essa rápida difusão são os benefícios econômicos decorrentes da adoção dessa tecnologia, devido à diminuição na utilização de inseticidas, já que é notória a redução de infestações por lepidópteros. Como reflexo da maior resistência da planta ao ataque de insetos, verifica-se a diminuição nos custos de produção, dispensando, na maioria das vezes, o uso de inseticidas para o controle da lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda*. Esse benefício foi observado até a safra de 2012/13.

Neste contexto, é relevante verificar se os benefícios econômicos da adoção das sementes *Bt* são maiores do que o custo dessa tecnologia, uma vez que o preço das sementes transgênicas é mais elevado que o das sementes convencionais, pelo fato do preço da semente *Bt* já contabilizar o custo evitado com aplicação inseticida, que o produtor teoricamente deixaria de ter ao adotar essa tecnologia. A literatura, por exemplo, indica que os preços de sementes de milho *Bt* são 20% superiores aos preços de sementes convencionais, computando aí a taxa de tecnologia (DUARTE, 2001). Segundo os dados de painel do Cepea, na região de Rio Verde, essa diferença oscilou entre 10% e 18% entre as safras 2009/10 e 2015/16 (Figura 18). Há que se mencionar que uma dificuldade que os produtores se referem nas últimas safras é a de obtenção de sementes de milho convencional, nessa região¹², assim como em outras produtoras de milho, o que, naturalmente, pode vir a afetar o diferencial desses preços.

¹² De acordo com entrevista com pesquisador responsável pelos levantamentos de campo Mauro Osaki e Lucilo Alves, em 2018.

Figura 18 - Evolução do preço real (R\$/ha) a valores de dezembro de 2015 da semente de milho *Bt* e convencional, após a introdução da tecnologia *Bt*, Rio Verde – GO.

Fonte: Elaboração própria com base no dados do Cepea (2018).

Nota: Conv.: Cultura Convencional; *Bt*: Cultura *Bt*.

Assim, considerando o preço superior da semente *Bt*, o agricultor que adota essa tecnologia deve levar em conta também os gastos adicionais que ele poderá ter com aplicações inseticidas para controle da lagarta *Spodoptera frugiperda*, já que esta é uma variável do custo que, destacadamente, afeta de forma crítica os benefícios econômicos esperados com a adoção dessa tecnologia. Ressalta-se, mais uma vez, que as aplicações inseticidas adicionais dependerão do grau ou frequência de infestação de pragas resistentes na lavoura *Bt*. Alguns estudos, como o de Duarte; Garcia; Cruz (2009) apontam que, em níveis baixos de infestação, os produtores preferem perder parcialmente em produtividade do que incorrer nos altos custos que a pulverização acarreta durante a condução da cultura.

Dessa forma, os produtores enfrentam uma situação de incerteza, ou seja, não sabem se podem ou não incorrer em gastos com aplicação de inseticidas, dependendo do nível de infestação de indivíduos resistentes das pragas. Com o surgimento de sementes de milho *Bt*, para reduzir os riscos de perda por ataque de lagartas, o agricultor, em geral, está disposto a arcar com o ônus do maior custo da semente transgênica, caso o custo seja menor ou equivalente aos gastos com o controle químico, uma vez que, ele espera que com a adoção dessa tecnologia haja aumento de renda dada pela redução de perda de produtividade por ataques de insetos.

Outras variáveis e suas alterações também são capazes de afetar o dimensionamento dos benefícios líquidos dos produtores de milho *Bt* pelo lado das receitas, como o aumento da produtividade e os preços do milho no mercado. No primeiro caso, de acordo com a literatura, Miguel et al. (2014), Lourenção; Fernandes (2013) e Benbrook (2001), parece haver um consenso sobre o aumento de produtividade com o uso de sementes transgênicas de milho *Bt*. Ou seja, de acordo com esses estudos, na prática, a semente *Bt* possui maior vigor do que a convencional, isto é, observa-se que a produtividade da semente *Bt* é superior a da semente não *Bt*. Por esse motivo, em geral, o agricultor ainda continua a adotar essa tecnologia, estando disposto a arcar com o ônus do maior custo da semente transgênica, mesmo diante dos gastos adicionais com o controle químico nas situações de elevada frequência de resistência das pragas, uma vez que, muitas vezes, o aumento da produtividade é capaz de gerar um crescimento da receita total que supera o crescimento do custo total de produção. Entretanto, esse comportamento não pôde ser constatado na análise dos dados reais de produtividade levantados para o caso da propriedade modal de Rio Verde (GO), já que se assumiu, durante a execução dos painéis do CEPEA, que a produtividade do transgênico foi igual à do milho convencional (Figura 20), tendo em vista que a colheita do milho na região não é segregada por tecnologia.

Sabe-se que os benefícios dependem também dos preços de milho ‘commodity’, os quais também foram considerados iguais para o milho *Bt* e convencional (Figura 20), para os dados reais de preço das propriedades modais de Rio Verde (GO), pelo fato de normalmente não haver segregação dos mercados de milho transgênicos e convencionais nessa região do Centro Oeste, devido ao aumento de custo que esse procedimento implica principalmente para o armazenamento e transporte¹³ (Schlecht, Wilson e Dahl, 2004) e logístico (Oliveira e Silveira, 2014) além dos produtores não receberem um prêmio pela colheita do milho convencional.

Portanto, a intenção de adotar a tecnologia de milho *Bt* é que os seus benefícios, dado pela redução com custos de aplicações inseticidas, superem os custos de sua adoção, isto é, o valor pago pelos produtores ao usar a semente de milho geneticamente modificada *Bt*. Porém,

¹³ O sistema de segregação para os grãos implica em aumento de custos com armazenamento e transporte, pois requer uma maior quantidade de compartimentos nas unidades de armazenamento ou a necessidade de implantação de silos com menor capacidade, de modo a permitir o armazenamento segregado. Além da falta de infraestrutura nos portos, que não estão adaptados ao processo de separação de cereais transgênicos e convencionais, e a deficiência das rotas de escoamento de produção. Como as distâncias percorridas pela safra de grãos desde o local da produção até os portos é muito grande no Brasil, geralmente acima dos mil quilômetros, são necessários muitos transbordos, envolvendo testes caros para averiguar se ela contém ou não organismos geneticamente modificados, encarecendo o processo de processo produtivo.

quando isso não ocorre há indícios de perda na eficiência dessa tecnologia, devido principalmente à evolução da resistência de pragas, que acaba exigindo que o produtor faça mais aplicações inseticidas.

Neste contexto é interessante analisar a evolução do gasto com inseticida para a produção de milho *Bt*, buscando observar indícios de quebra na eficiência da semente *Bt* para o controle de pragas e evolução da resistência. No período, de 2009/10 a 2012/13, o gasto com inseticida na produção de milho com sementes geneticamente modificadas foi reduzido, em relação às variedades convencionais. Para o milho de segunda safra, em Rio Verde (GO), a média dos gastos com inseticidas para o grão convencional equivaleram a R\$ 83,00 por hectare, para o milho convencional e R\$ 14,72 por hectare para o milho *Bt*, o que correspondeu à respectivamente, 4% e 1% do custo operacional com insumos, evidenciando que o produtor não tinha necessidade de aplicações extras de inseticidas e a tecnologia *Bt* expressava sua máxima eficiência.

Mas ao longo dos anos, após a safra de 2012/13, no grupo de defensivos agrícolas, a produção de milho segunda safra passa a registrar maiores gastos com fungicidas e inseticidas, mesmo nos cultivos com o transgênico. Na safra de 2013/14, de fato, o gasto com inseticidas para a produção de milho *Bt* triplicou, passando de R\$ 14,338 por hectare, em 2012/13, para R\$ 51,519 por hectare em 2013/14, em termos reais. O montante despendido com inseticidas permaneceu registrando valores mais altos nos anos posteriores, indicando perda na eficiência de controle de pragas pela tecnologia *Bt*, exigindo maior número de aplicações inseticidas

Se se considerar a evolução da adoção das tecnologias de milho transgênicas nesse período, é possível evidenciar que a ideia da necessidade de maiores gastos com inseticidas é, de fato, resposta à evolução da resistência de pragas. As primeiras tecnologias de milho usadas na região de Rio Verde (GO), nos anos safra de 2009/10 até 2010/11, foram principalmente, YieldGard (Cry 1Ab), Agrisure (Cry 1Ab) e Herculex (Cry 1F) (Guerra, Silva e Francischini, 2013). Nesse período, que coincidiu com a então recente liberação dessas tecnologias, as proteínas inseticidas apresentavam máxima expressão e a praga *S. frugiperda* era eficientemente controlada, sem a necessidade de aplicações extras inseticidas para lagarta. Os levantamentos do CEPEA, de fato, apontavam que em 2011/12 as despesas com inseticidas deveram-se ao controle de outros insetos que não a *S. frugiperda*.

Assim, pela Figura 19, verifica-se que até a safra de 2012/13 a tecnologia *Bt* era eficiente no controle da lagarta do cartucho. Porém, a partir desse período, ao longo do tempo, com o uso intensivo dessas tecnologias, a frequência de indivíduos resistentes foi aumentando

em populações de *S. frugiperda*, principalmente para a proteína Cry 1F e Cry 1Ab, reduzindo o potencial de controle dessas pragas, e exigindo medidas complementares para o seu controle (Horikoshi, 2016). Isto se evidencia, na Figura 19, pela necessidade de um maior número de aplicações inseticidas a partir de 2012/13, culminado em 3 aplicações inseticidas contra lagarta do cartucho na safra de 2013/14, o que até aquele momento era incomum nos cultivos de milho *Bt*.

A posterior redução no número de aplicações inseticidas nas safras de 2014/15 e 2015/16, está relacionada à adoção de tecnologias que expressavam mais de uma proteína inseticida, visto que aquelas expressando apenas uma proteína já apresentavam falha de controle. A presença de novas variedades transgênicas, disponíveis no mercado, atenuou a necessidade de aplicações extras de inseticidas. Assim, na safra de 2014/15 destacou-se o uso das variedades transgênicas de milho VTPRO (Cry 1A.105 + Cry 2Ab2), PowerCore (Cry 1A.105 + Cry 1F + Cry 2Ab2), Optimum Intrasect (Cry 1Ab + Cry 1F) e VT PRO 3 (Cry 1A.105 + Cry Ab2) e Viptera 3 (Cry 1Ab + Vip 3Aa20). E na safra de 2015/16, destacou-se o uso de Viptera 3 (Cry 1Ab + Vip 3Aa20) e Leptra (Cry 1Ab + Cry 1F + Vip Aa20) (FARIAS et al., 2014a; BERNARDI et al., 2015).

Apesar das novas tecnologias, contudo, ainda houve necessidade de aplicações inseticidas adicionais nessas safras, devido à ocorrência de resistência cruzada entre essas proteínas de *Bt* (principalmente devido à resistência à Cry 1) e/ou pelo fato de a expressão de uma das proteínas não ser suficiente para o controle daqueles insetos resistentes à outra proteína. Este último é o caso da Cry2A, que apresenta baixa expressão para o controle de *S. frugiperda*.

Figura 19 - Número de aplicações inseticidas para controle de lagartas no milho segunda safra *Bt* e convencional, na região de Rio Verde (GO).

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do Cepea (2018).

Segundo relatos da própria equipe do Cepea, em relatórios técnicos como o de Osaki; Alves; Barros (2015), vários produtores mencionam que a eficiência das cultivares *Bt* de milho está cada vez menor, com necessidade de crescentes pulverizações contra insetos. Outra evidência da evolução da resistência pode ser dada pela redução na diferença dos custos com inseticidas para a produção de milho *Bt* e do convencional, ao longo do período de 2009 até 2015. Nas safras de 2013/12 até 2015/16, a média dos gastos com inseticidas (produto e operações mecânicas) para produção de milho convencional representaram 4%, enquanto para o milho *Bt* representaram 2% do custo operacional com insumos (Figura 20).

Figura 20 - Evolução dos custos com insumos para a produção de milho *Bt* segunda safra na região de Rio Verde (GO).

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do Cepea (2018).

De forma mais detalhada do que na Figura 17, a Figura 21, aponta as porcentagens de uso das quantidades inseticidas de alguns ingredientes ativos por hectare para cultura do milho segunda safra com tecnologia *Bt* e convencional, na região de Rio Verde (GO). Vale ressaltar que, os principais grupos de inseticidas para controle da lagarta-do-cartucho no milho segunda safra são os organofosforados (triazofós, triclorfon e parathion metílico), carbamatos (carbaril, metomil e tiodicarbe), piretróides (permetrina e lambdacialotrina), inibidores da síntese de quitina (lufenuron, diflubenzuron, triflumuron, novaluron e clorfuazuron) e espinosinas (espinosade) (ALMEIDA; CAVALCANTE; SORDI, 1964; WAQUIL et al., 1982; COSTA et al., 2005).

Figura 21 - Porcentagem de uso da quantidade inseticida de ingrediente ativo por hectare para cultura do milho segunda safra com tecnologia Bt e convencional, na região de Rio Verde (GO).

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do Cepea (2018).

De acordo com a Figura 21, observa-se que o metomil foi o ingrediente ativo mais empregado pelo produtor rural para controle de *Spodoptera frugiperda*, tanto no milho Bt quanto no convencional, desde as safras de 2009/10 até 2015/16. A exceção foi em 2011/12, quando predominou o uso de acefato no milho Bt e acefato e lufenuron mais profenós no cultivo do milho convencional.

No caso do milho Bt, nas safras de 2009/10, foi realizada apenas uma aplicação inseticida para lagarta *Spodoptera frugiperda*, com uso predominante de metomil e parte com cipermetrina. Já nas safras de 2010/11 e 2011/12, não foram registradas aplicações inseticidas para *S. frugiperda*. No entanto foram registrados custos com inseticidas na safra de 2011/12 devido à necessidade de controle químico de outros insetos, para o qual foram utilizadas doses principalmente de acefato. Na safra seguinte, os dados de painel indicam que, o mais frequente na região, foi realizar uma aplicação inseticida contra a lagarta do cartucho com o ingrediente ativo metomil.

A partir de 2013/14 o número de aplicações necessárias para o controle da lagarta do cartucho aumentou, chegando a três aplicações nesse ano no qual prevaleceram três ingredientes ativos para controle de lagartas: imidacloprido, lufenuron e metomil. Em 2014/15

a moda nos cultivos do milho safrinha transgênico em Rio Verde foi a adoção de duas aplicações inseticidas de metomil.

Na safra seguinte, de 2015/16, novamente predominou apenas uma aplicação inseticida. Nesse ano esperava-se que o número dessas pulverizações permanecesse em patamares maiores do que 1, visto que o cultivo *Bt* já vinha demonstrando queda de eficiência no controle de pragas. No entanto, a quebra de safra nesse período, decorrente das condições climáticas inadequadas para o cultivo do milho segunda safra, causou abandono da safra pelo produtor. Os produtores perceberam que a baixa produtividade esperada (registrou-se a marca de 60 sacas por hectare) não poderia ser recuperada com maiores esforços em manejo, não sendo viável, portanto realizar mais aplicações inseticidas para o controle das pragas. Desse modo, pode-se considerar que, no contexto do estudo sobre os efeitos da resistência das pragas à tecnologia *Bt*, a safra de 2015/16 é um *outlier* e deve ser examinada com cautela.

Quando se fala sobre resistência de pragas a inseticidas é importante ressaltar sobre a importância de selecionar, quando possível, inseticidas, evitando sobreposição de princípios ativos, com o intuito de reduzir a pressão de seleção na área de interesse. Dessa forma, de acordo com Hoy; Head; Hall (1998) existe a possibilidade de misturas de compostos, diante das quais os insetos são expostos, de modo simultâneo, a dois ou mais ingredientes ativos, com diferentes mecanismos de ação. O princípio dessa tática é a eliminação dos indivíduos resistentes a um princípio ativo de um inseticida, quando os mesmos entram em contato com o outro composto.

De acordo com Curtis (1985), quando se utiliza a mistura de compostos, é fundamental manter ‘áreas de refúgio’, que não receberão inseticidas, com o objetivo de preservar indivíduos susceptíveis, para retardar a disseminação da resistência. O sucesso do uso combinado de compostos depende da inexistência de resistência cruzada entre os inseticidas, pois neste caso, os únicos sobreviventes seriam aqueles indivíduos resistentes aos dois produtos (Hoy, Head e Hall, 1998).

Na Figura 22, faz-se um comparativo entre os custos de semente, do restante dos insumos e o custo operacional efetivo (CO) do milho de segunda safra *Bt* e convencional, mostrando que desde a safra de 2010/11 até 2015/16, embora fossem registradas reduções nas despesas com insumos promovidas pela tecnologia *Bt*, os custos da semente *Bt* foram sempre superiores ao da semente convencional, suficiente para tornar o CO da produção de milho *Bt* superior ao do milho convencional.

Conforme comentado anteriormente, o possível desenvolvimento de resistência nas pragas ao cultivo de milho *Bt* requer mais aplicações inseticidas para seu controle. Outros

trabalhos já abordaram essa questão, como o estudo realizado pelo IMEA (2014), sobre estimativas do impacto dessas aplicações extras no custo de produção do milho na safra 2013/2014 em Mato Grosso, ressaltando o problema do aumento do ataque de lagartas nas lavouras, com destaque para a Lagarta do Cartucho (*Spodoptera frugiperda*), devido à forte pressão de seleção, na qual sobreviviam, em sua maioria, os indivíduos resistentes ao efeito *Bt*.

Figura 22 - Comparativo entre evolução dos custos com semente, inseticidas e demais Custo Operacional Efetivo (CO) do milho segunda safra *Bt* e convencional, Rio Verde (GO).

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do Cepea (2018).

Na safra de 2013/14 o IMEA verificou aumento do número de aplicações de inseticidas nas lavouras de milho *Bt* (utilizado em 88% das lavouras de milho em Mato Grosso), em todas as regiões analisadas (médio-norte, sudeste, oeste, centro-sul, nordeste) daquele estado. Em praticamente todas as regiões o número de aplicações dobrou em relação aos anos anteriores.

De acordo com IMEA (2014) duas aplicações de inseticidas são consideradas normais e estas já estão quantificadas dentro do custo de produção. No levantamento do IMEA (2014), a região que apresentou os maiores registros de aplicações de inseticidas para o controle das lagartas foi a região oeste do Estado, com média de 5 aplicações, mas onde alguns produtores chegam a realizar 6 aplicações por hectare. Conclui-se que o impacto das 5 aplicações no custo é um adicional de R\$ 111,02/ha em relação às duas aplicações consideradas normais para o controle das pragas. Tomando-se o custo de produção para o milho de alta tecnologia de R\$

1.394,53/ha, este gasto teve um impacto econômico de 8% sobre o custo de produção do agricultor (IMEA, 2014).

No estudo de IMEA (2014) a média ponderada das aplicações de inseticidas para Mato Grosso ficou em 4 aplicações, com impacto econômico de 4,4% e média do custo adicional de R\$ 72,96/ha. Desta forma, considerando as 4 pulverizações e os custos médios também para cada região, o impacto econômico das aplicações extras de inseticidas para todo o estado poderia chegar à R\$ 228.793 milhões.

É importante ressaltar que as aplicações extras de inseticidas geram impactos econômicos em todas as regiões produtivas do Brasil, inclusive no estado de GO, objeto de estudo do presente trabalho, e provavelmente, a falta do uso de técnicas adequadas de manejo integrado de pragas e do refúgio acelerou o processo de quebra de resistência do gene *Bt*, recaindo sobre o produtor os custos adicionais para o controle das pragas.

5.3 Resultados da análise de viabilidade econômica da produção de milho *Bt*

A análise de viabilidade econômica efetuada no presente trabalho busca dimensionar os benefícios líquidos da produção de milho com sementes *Bt*, levando em consideração que estes dependem de uma série de variáveis e de suas variações ao longo do tempo, como é o caso da evolução da frequência de lagartas *S. frugiperda* resistentes a essa tecnologia. Para tanto, o estudo leva em consideração um efeito da resistência nos custos de produção, a saber: o aumento de despesas vinculadas a um aumento nas aplicações de inseticidas.

A primeira etapa dos resultados mostra a análise de viabilidade econômica da produção de milho *Bt*, levando em consideração cenários que simulam a evolução da frequência de lagartas de *S. frugiperda* resistentes por meio do aumento do número de aplicações inseticidas. Para isso estabeleceram-se fluxos de caixa para cada cenário, com horizonte temporal de 10 anos, nos quais discriminando os fluxos de custo médio de sementes, mão de obra e demais itens que compõem o CO. Para estimar os custos médios, foram empregados os dados disponíveis dos painéis referentes às safras de 2009/10 até 2015/16, e que, transformados a valores reais, foram pressupostos como constantes ao longo dos 10 anos de projeção do fluxo de caixa.

O primeiro fluxo de caixa para um período de 10 anos, correspondente ao cenário A, simulou eficiência máxima da tecnologia *Bt*, assumindo que o produtor não precisa fazer aplicações inseticidas para o controle de lagartas. Para tanto os dados de custo com inseticida e

pulverização considerados nos cálculos corresponderam à média dos custos originais, a valores reais de 2015, da pulverização inseticida (custo do inseticida + despesas para pulverização) observados nos anos em que, de fato, o produtor não realizou aplicações inseticidas no milho *Bt*. Ou seja, é a média dessas despesas efetuadas nas safras 2010/11 e 2011/12.

Nos cenários 1B, 2B e 3B, os fluxos de caixa simularam respectivamente que o produtor teria a necessidade de realizar 1, 2 e 3 aplicações inseticidas, durante os 10 anos de projeção, para complementar o controle de lagartas, devidas à ineficiência da tecnologia *Bt* nesse controle. Portanto, os dados de custo com inseticida e sua aplicação utilizados nos fluxos de caixa, em cada um desses cenários, foram a média daqueles custos reais (a valores de 2015) observados em cada ano safra no qual o produtor, efetivamente, na região de Rio Verde, precisou realizar esse número de aplicações. Ou seja, no cenário 1B, tomou-se o custo com inseticidas e pulverização registrado pelo Cepea no painel da safra de 2009/10, 2012/13 e 2015/16; no cenário 2B, os valores levantados pelo painel nessa mesma região, em 2014/15; e, no cenário 3B, o valor real dos gastos desses itens na safra 2013/14. Da mesma forma, esses dados foram mantidos constantes durante os 10 anos do estudo.

Considerando a existência de risco, dado pela variabilidade nas variáveis preço e produtividade, é importante introduzir a análise de risco de modo a se verificar em que condições os benefícios econômicos do milho transgênico se confirmam. A metodologia adotada para tal análise é a da simulação de Monte Carlo, na qual se considerou que os benefícios líquidos podem oscilar em função de duas variáveis críticas: (1) produtividade do milho transgênico *Bt* e (2) preço do milho *Bt*. As funções de distribuição de probabilidade dessas variáveis críticas foram estimadas e incluídas nas equações do Valor Presente Líquido (VPL) e Coeficiente Benefício/Custo (B/C). Assim, utilizando a simulação de Monte Carlo, esses dois conjuntos de indicadores foram estimados, permitindo desenhar cenários econômicos associados à sua probabilidade de ocorrência.

A produtividade do sistema de produção de interesse foi obtida pela média das produtividades modais observadas desde a safra de 2009/10 até a de 2015/16, obtendo-se o valor de 95 sacas por hectare. Mas no processo de definição da distribuição de probabilidades para a probabilidade como fator de risco, aproximaram-se os valores registrados na base do Cepea para esse mesmo período a uma distribuição triangular. A partir desse procedimento, chegou-se à produtividade de 88,57 sacas por hectare, como a média dessa distribuição. Os demais parâmetros usados foram as aproximações do valor mínimo (60 sacas por hectare) e o máximo (109,92 sacas por hectare), observados nesse mesmo período de tempo na região de estudo, segundo os levantamentos do Cepea.

O mesmo procedimento foi adotado para se obter a distribuição de probabilidade dos preços do milho *Bt*, nível produtor. Determinou-se uma distribuição triangular com valores mínimo (R\$ 18,49 por saca de 60Kg), médio (R\$ 22,68 por saca de 60 Kg) e máximo (R\$ 27,27 por saca de 60 Kg), como aproximação dos dados registrados na base do Cepea para o mesmo período de tempo. Os parâmetros das distribuições triangulares do preço e produtividade do milho, valores mínimos, médios e máximos e as estimativas de quão prováveis são esses valores a serem excedidos, bem como o valor mais provável, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros das distribuições triangulares das variáveis de risco: preço e produtividade do milho *Bt* produzido na região de Rio Verde (GO), com base no período de 2009/10 a 2015/16.

Nome	Gráfico	Mínimo	Média	Máximo	5%	95%	Erros
Preço		18,49	22,68	27,27	19,76	25,80	0,00
Produtividade		60,14	88,57	109,92	69,44	104,02	0,00

Fonte: Elaboração própria.

Após definidas as funções de distribuição para cada variável de risco, assim como as estatísticas que permitem a geração de dados aleatórios, foram simulados 50.000 novos dados para cada uma, por meio do software @Risk. Com os novos dados, elaboraram-se os gráficos de distribuição acumulada e gráficos de distribuição de frequência, considerando numa análise as distribuições de VPL e Coeficiente B/C para os quatro cenários deste estudo de caso, visando facilitar o entendimento das diferenças entre esses indicadores à medida que se observa a evolução da resistência no cultivo *Bt*.

Na análise das distribuições de frequência, para os quatro cenários, pretende-se observar qual o nível de VPL e B/C ocorre com maior frequência na distribuição gerada, esses níveis corresponderão aos valores médios do VPL e coeficiente B/C. Assim, verifica-se qual o VPL e B/C médio em cada um dos cenários, buscando evidenciar que esses valores médios, vão se reduzindo à medida em que se observa aumento da resistência de pragas. Neste caso, a maior média de VPL e B/C seria obtida no cenário A, em detrimento dos cenários 1B e 2B respectivamente, bem como o menor valor médio de VPL e B/C seria registrado no cenário 3B. Recorda-se que o Cenário A considera uma área agrícola de produção de milho *Bt* onde a frequência de lagartas resistentes está abaixo do nível de dano econômico, ou seja, é o cenário

base; o cenário B considera uma área de milho *Bt* onde há uma gradual evolução da frequência de lagartas resistentes até atingir a falha de controle do cultivo *Bt*, capaz de causar danos econômicos significativos para o produtor rural. As subdivisões em cenários 1, 2 e 3 se relacionam ao número de aplicações inseticidas.

Analizando os gráficos de distribuição acumulada, pretende-se examinar que a probabilidade de risco, isto é, a probabilidade de ocorrência de valores de VPL menores que zero, bem como valores de B/C menores que um, aumenta à medida em que a resistência das pragas evolui. Assim, a menor probabilidade de obter um $VPL < 0$ e uma relação $B/C < 1$ ocorre no cenário A, em detrimento dos cenários 1B e 2B respectivamente, bem como a maior probabilidade de ocorrência de $VPL < 0$ e $B/C < 1$ seria dada no cenário 3B.

Em uma segunda etapa, para complementar os resultados obtidos com a metodologia proposta neste estudo de caso, comparou-se a viabilidade econômica da produção de milho *Bt* à viabilidade econômica da produção de milho convencional, tomando por base os dados de painel do Cepea, disponíveis para as sete últimas safras de milho. Essa etapa dos resultados objetivou observar se, de fato, o benefício líquido da produção *Bt* foi se reduzindo em relação ao convencional, nas condições de preço e produtividade originais observadas para cada ano safra, o que indicaria a evolução da resistência da lagarta *S. frugiperda*. Essa comparação foi feita principalmente observando os resultados do coeficiente de benefício-custo para cada ano safra, para ambas tecnologias, transgênica e convencional.

5.4 Análise de risco de viabilidade econômica de produção de milho *Bt* em função da evolução da frequência de lagartas *Spodoptera frugiperda* resistentes

Os resultados da análise de risco dados pela distribuição de probabilidade acumulada e gráficos de distribuição de frequência para os indicadores de VPL e coeficiente B/C para a produção de milho *Bt* em Rio Verde, em função da evolução da resistência de lagartas (simulada a partir do aumento de aplicações inseticidas), nos cenários 1B, 2B e 3B, para 10 anos de estudo, constam nas Figuras 23 e 24, respectivamente. Na Figura 23 observam-se as probabilidades de ocorrência de lucros negativos com a produção de milho *Bt*, por meio do método de Monte Carlo para simulação das variáveis preço e produtividade.

Os resultados dessa simulação, evidenciados na Figura 23, mostram que, à medida que aumenta a frequência de lagartas *S. frugiperda* resistentes à tecnologia *Bt*, aumenta o número de aplicações inseticidas, elevando o risco de lucro negativo na atividade do produtor.

Figura 23 - Distribuição de probabilidade acumulada de valores do VPL da produção de milho *Bt*, para os cenários A, 1B, 2B e 3B em Rio Verde (GO).

Fonte: Elaboração própria.

Esses resultados podem ser observados pelo aumento da probabilidade de o VPL ser negativo, conforme cresce o número de aplicações e a frequência de lagartas resistentes evolui. No cenário A, onde a tecnologia *Bt* possui máxima eficiência e o agricultor não tem necessidade de realizar aplicações inseticidas, a probabilidade do VPL ser negativo é de 55%. No entanto, essa porcentagem aumenta para 65 % nos cenários 1B e 2B, onde o produtor vê necessidade de realizar pelo menos uma ou duas aplicações inseticidas, respectivamente, para complementar o controle de pragas. Já quando se observa o cenário 3B, onde o produtor precisa fazer 3 aplicações inseticidas adicionais, a probabilidade do VPL ser negativo aumenta ainda mais, correspondendo a 70%.

De forma geral, verificou-se que a partir do momento em que a resistência de pragas se estabelece no cultivo de plantas *Bt*, em 70% das simulações encontrou-se uma situação de risco ou inviabilidade econômica da produção, já que o risco indica a chance que o produtor tem de não atingir o seu objetivo econômico, que é a obtenção de receitas líquidas positivas, ou lucros. À medida que a frequência de lagartas resistentes aumenta, exigindo mais aplicações inseticidas, a probabilidade de a produção dessa cultura ser inviável economicamente aumenta.

Os dados detalhados dos percentis de risco do VPL da produção de milho *Bt*, simulados para os cenários A, 1B, 2B e 3B para 10 anos, referentes à Figura 23, são apresentados na Tabela 20 do Anexo C. Nesta Tabela, nota-se que, na situação de valores mínimos para preço (R\$ 18,49 por saca 60 Kg) e produtividade (60 sacas/ha), a produção de milho *Bt* torna-se inviável economicamente para todos os cenários considerados, independentemente do grau de evolução da resistência de pragas e inclusive na situação do cenário A. Cenário este em que se assume ausência de efeitos da presença de pragas resistentes em frequência suficiente para ocasionar danos econômicos ao produtor, e, por isso, é o cenário em que se pressupõe que a tecnologia *Bt* expressa sua máxima eficiência.

Em contrapartida, na situação de valores máximos para preço (R\$ 27,27 por saca de 60 Kg) e produtividade (109,92 sacas/ha), a produção de milho *Bt* torna-se viável economicamente para todos os cenários considerados, independentemente do grau de evolução da resistência de pragas, até o limite testado de três pulverizações com inseticidas. No entanto, os resultados mostram que quanto menor a necessidade de aplicações inseticidas, melhor é o resultado econômico da produção *Bt*.

Na Figura 24 é possível observar os níveis de VPL da produção de milho *Bt*, e a frequência com que ocorrem nos cenários A, 1B, 2B e 3B, através da simulação de valores aleatórios para preço e produtividade.

Os resultados dos níveis de VPL da Figura 24 indicam que, com o aumento da frequência de lagartas *S. frugiperda* resistentes no cultivo de milho *Bt*, os valores médios do VPL, de fato, vão se reduzindo do cenário A para B3, indicando que, quanto maior a necessidade de aplicações inseticidas pior é o resultado econômico da produção *Bt*. O cenário A, apresentou maior VPL quando comparado aos demais cenários, evidenciando ser a melhor opção para o produtor rural. Mas quando há a necessidade de se realizar pelo menos uma aplicação inseticida contra a lagarta do cartucho, o VPL assume valor negativo médio de R\$/ha -1266,23. Esse valor assume valores ainda mais negativos quando é preciso realizar de 2 e 3 aplicações adicionais, assumindo valores de R\$/ha -1276,77 e -1432,57, respectivamente.

No entanto, é importante ressaltar que, o valor médio do VPL foi negativo em todos os cenários, inclusive no cenário A, onde ocorre a situação de máxima eficiência da tecnologia *Bt*, embora este seja um valor relativamente maior do que aqueles obtidos nos demais cenários (R\$/ha -393,75). Era de se esperar que este fosse um valor positivo, evidenciando o real benefício do cultivo de milho *Bt*, em condições de baixa frequência de pragas resistentes. No entanto, pelo fato de os produtores da região de Rio Verde (GO) não colherem o grão de milho

por tecnologia, o painel dessa região considerou valores modais iguais de produtividade e preço entre milho *Bt* e convencional.

Acredita-se que este possa ser o motivo de um resultado negativo para o VPL do cenário A, uma vez que, em condições reais de campo, a semente *Bt* possui maior vigor que a variedade convencional disponível atualmente no mercado, garantindo maior produtividade do milho *Bt* (acima da média considerada neste trabalho de 88,57 sacas por hectare) em detrimento do convencional, o que garante uma renda superior aos custos totais de produção dessa cultura, quando a tecnologia *Bt* tem máxima eficiência¹⁴. Isso explica o fato de os produtores continuarem adotando essa tecnologia em detrimento dos cultivos convencionais.

¹⁴ De acordo com várias fontes, dentre relatos de produtores e técnicos, dentre eles os do Dr. Celso Omoto e do Dr. Mauro Osaki, até trabalhos na literatura, como de Miguel et al. (2014), Lourenção; Fernandes (2013) e Benbrook (2001), parece haver um consenso de que a produtividade de cultivos *Bt* é superior à dos cultivos convencionais, em condições reais de campo.

Figura 24 - Distribuição de frequência de valores do VPL da produção de milho *Bt*, para os cenários A, 1B, 2B e 3B em Rio Verde (GO).

Fonte: Elaboração própria.

Com relação à análise de risco para o indicador econômico Coeficiente benefício custo (B/C), os resultados apresentados na Figura 25 também mostram que o milho *Bt* apresenta maior grau de prejuízo à medida que aumenta a necessidade do número de aplicações inseticidas, isto é, a viabilidade econômica da produção dessa cultura se torna reduzida.

Neste caso, os resultados mostram que o avanço da resistência de lagartas contribui para a probabilidade de o coeficiente benefício custo ser menor do que um. No cenário A, por exemplo, a probabilidade de B/C ser menor que um é de 55%. No entanto, essa probabilidade aumenta para 65 % nos cenários 1B, 2B e 3B. Ressalta-se que, acima desse nível de risco, embora os resultados já evidenciem valores de B/C maiores que a unidade para os três cenários, o prejuízo no cenário 3B mostra-se maior do que no cenário 2B e 1B respectivamente.

Figura 25 - Análise gráfica da distribuição de probabilidade acumulada de valores do B/C da produção de milho *Bt*, para os cenários A 1B 2B e 3B em Rio Verde (GO).

Fonte: Elaboração própria.

Com isso é possível mostrar que, de acordo com o indicador B/C, quando o agricultor tem a necessidade de realizar 3 aplicações inseticidas para o controle de pragas na cultura do milho *Bt*, que é a média de aplicações que se faz no milho convencional, há 65% de chances dos custos de produção serem superiores à receita bruta auferida com o cultivo do milho *Bt*, fazendo com que o produtor não obtenha lucro com essa atividade produtiva.

Desperta atenção o fato de que a ocorrência de benefício custo menor que um, para os cenários que simulam evolução da resistência de lagartas, se dá a níveis relativamente altos de risco (acima de 65% para os cenários 1B, 2B e 3B). Nesse contexto, pode-se indagar acerca da motivação dos produtores para manterem a produção de milho *Bt* mesmo diante do aumento do custo de produção dado pela necessidade crescente de pulverizar a cultura com inseticidas. Portanto, estes resultados demonstraram que à medida que a resistência de lagartas avança, o risco de prejuízo econômico é maior.

Os dados detalhados dos percentis de risco do coeficiente B/C da produção de milho *Bt*, simulados para os cenários A, 1B, 2B e 3B para 10 anos de estudo referentes à Figura 25 são apresentados na Tabela 21 do Anexo C. Nesta Tabela, observa-se que, para os valores mínimos de preço e produtividade, ou seja, em um cenário pessimista, verifica-se que a produção de milho *Bt* piora os resultados do coeficiente benefício custos, apresentando resultado significativo menor que um, não havendo viabilidade econômica em produzir milho *Bt*, independente da evolução da resistência de lagartas, pois neste caso a produtividade e os preços de mercado da cultura do milho não serão suficientes para gerar uma renda capaz de cobrir os custos de produção.

No entanto, no cenário otimista, de máximos valores para preço e produtividade, haverá sempre viabilidade econômica em produzir milho *Bt*, para todos os cenários considerados, pois neste caso a produtividade e os preços de mercado do milho serão suficientes para gerar uma renda capaz de suprir os custos de produção, gerando lucro ao agricultor. Contudo, verifica-se ainda na Tabela 21 que mesmo sob condições otimistas de preço e produtividade, os prejuízos são maiores em produzir milho *Bt* à medida em que há necessidade de mais aplicações inseticidas devido à evolução da resistência das lagartas.

Os resultados da frequência de ocorrência dos níveis do coeficiente B/C na Figura 26 indicam que o valor médio do índice B/C no cenário A é maior do que o valor médio dos cenários 1B, 2B e 3B, de modo que indicando que, a necessidade de realizar 1, 2 ou 3 aplicações inseticidas já é suficiente para tornar os custos superiores à receita total com igual nível de impacto ao produtor rural. O cenário A, apresentou maior média de coeficiente B/C quando comparado aos demais cenários, como esperado.

Figura 26 - Distribuição de frequência de valores do coeficiente B/C da produção de milho *Bt*, para os cenários A, 1B, 2B e 3B em Rio Verde (GO).

Fonte: Elaboração própria.

É importante ressaltar que, os dados utilizados para projetar valores de custos e renda, a nível do produtor, neste estudo de caso são baseados nos dados das safras anteriores, sem pressupor ainda maior nível de indivíduos resistentes das pragas, que exija aplicações inseticidas superiores às 3 já constatadas no milho *Bt*, na região de Rio Verde (GO). Para pressupor maiores níveis de indivíduos resistentes de pragas faz-se necessário elaboração de um modelo de dispersão da praga *Spodoptera frugiperda*, tomando por base os modelos de otimização apresentados na metodologia deste trabalho, que permita dar suporte a aumentos das taxas de pulverização, bem como choques sobre a produtividade.

No item a seguir, para complementar os resultados foi elaborada uma análise de viabilidade econômica comparando a produção de milho *Bt* com a convencional. Primeiramente por meio de uma análise estática de viabilidade econômica (sem uso do método de Monte Carlo) utilizando dados reais de custos, preço e produtividade das sete safras de 2009/10 até 2015/16, observando principalmente o índice B/C. Posteriormente por meio da análise de risco do VPL e B/C, com uso do Método de Monte Carlo para simular as variáveis de risco preço e produtividade.

5.5 Análise estática da viabilidade econômica do milho *Bt* e convencional

O fluxo de caixa e os resultados da análise estática de viabilidade econômica da produção de milho *Bt* e convencional para os dados originais das sete safras do painel da propriedade modal de Rio Verde, na qual se compara a viabilidade econômica dessas duas tecnologias, sem empregar o método de Monte Carlo para simulação das variáveis preço e produtividade, encontram-se nas Tabelas 12 e 13.

Levando em consideração a realidade da evolução dos custos e da renda do produtor, dada pela produtividade e preços do milho, tecem-se algumas considerações para a produção de milho *Bt* e convencional.

No caso do cultivo do milho *Bt*, embora essa tecnologia tenha sido anunciada como sendo capaz de aumentar a produtividade das lavouras, a transgenia tem também como efeitos, em termos econômicos, a diminuição das perdas causadas por fatores bióticos não resistentes a essa tecnologia, que atuam no meio ambiente onde as mesmas são cultivadas (DUARTE, 2001; NILL, 2003; GIANESSI; CARPENTER, 1999). Neste estudo de caso específico, para a região de Rio Verde, no Goiás, não pôde ser constatado aumento de produtividade decorrente do uso da semente *Bt*, pois o painel dessa região considerou que a produtividade do cultivo

convencional foi praticamente a mesma daquela do cultivo com *Bt*, em todos os anos safras, já os produtores desse município normalmente não colhem o grão por tecnologia.

Tabela 12 - Fluxo de caixa da produção de milho *Bt* para as safras de 2009/10 até 2015/16 e resultados da análise estática de viabilidade econômica da produção de milho *Bt*, a valores reais de 2015. Estudo de caso para Rio Verde (GO).

Custos da área <i>Bt</i> (R\$/ha)	Anos						
	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Semente	476,03	380,85	516,42	394,32	454,92	456,41	400,00
Inseticida	32,14	0,00	12,39	14,34	51,52	33,40	35,68
Maquinário ¹⁵ (Pulverização)	17,27	0,00	2,85	11,14	4,89	5,56	2,75
Mão de Obra ¹⁶	143,42	160,82	183,08	173,14	98,56	62,31	52,51
Outros	1.484,79	1.641,13	1.567,05	1.381,27	1.763,53	1.576,04	1.424,44
Custo Operacional Efetivo ¹⁷	2.153,68	2.618,00	2.849,00	2.690,00	3.397,00	3.119,00	3.116,00
Custo Operacional Efetivo Presente	2.153,68	2.506,22	2.610,91	2.359,95	2.852,96	2.507,64	2.398,27
Benefícios							
Produtividade (sacas/ha)	90,00	80,00	110,00	110,00	110,00	110,00	60,00
Preço real (R\$/saca)	18,47	27,29	23,15	21,39	19,90	20,82	25,00
Receita bruta (R\$/ha)	1.662,30	2.183,28	2.546,17	2.352,79	2.189,33	2.289,87	1.500,00
Receita Bruta Presente	1.662,30	2.090,06	2.333,39	2.064,11	1.838,70	1.841,03	1.154,49
B/C	0,77	0,83	0,89	0,88	0,64	0,73	0,48

Fonte: Elaboração própria com base nos dados dos painéis elaborados para a região de Rio Verde (GO).

Nota: A taxa de desconto real utilizada foi de 4,46% a.a.

De acordo com Fernandez-Cornejo et al. (2000), os ganhos dos cultivos de milho *Bt* são derivados da redução do uso de defensivos e da diminuição da perda de produtividade

¹⁵ Os valores de custo com maquinário na operação de pulverização não estão discriminados somente para inseticidas contra lagarta, envolvendo os custos com pulverização de inseticidas, herbicidas, fungicidas, dentre outros, pela dificuldade de segregar esses custos devido ao fato de muitos desses produtos serem aplicados em uma mesma operação mecânica.

¹⁶ Os valores de custo com mão de obra não estão discriminados somente para aplicação inseticida contra lagarta, sendo apresentado de forma geral para toda a safra.

¹⁷ Os valores do Custo Operacional Efetivo (COE), representam a soma dos custos com insumos, operações mecânicas, operações terceirizadas, mão de obra, irrigação, custo geral, comercialização, impostos, seguro, assistência técnica e juros de capital de giro. Nesse estudo de caso não foi contabilizado o Custo total (CT), portanto não considera os valores de depreciação de máquinas e equipamentos e a remuneração do capital investido, como o custo de oportunidade da terra e de outros imobilizados.

causada pelas pragas, desde que estas não sejam resistentes à tecnologia *Bt*. Portanto, com a produção do milho *Bt*, o menor uso de inseticidas promoveria a redução nos custos com controle químico, mas de acordo com os dados levantados em Rio Verde (GO) o volume desta redução não foi tão expressivo. Entre as safras 2009/10 e 2012/13 o custo com inseticidas foi relativamente baixo, mas após esse período observou-se um aumento nessa categoria, contribuindo para a suposição de aumento de frequência de lagartas resistentes ao cultivo *Bt*.

A literatura, contudo, indica que, na ausência de resistência de pragas, a redução nos gastos com inseticidas promovida pela tecnologia *Bt*, quando combinada com a redução da perda de produtividade, tem sido mais que suficiente para cobrir os custos adicionais com a elevação do preço da semente *Bt* (DUARTE, 2001; FERNANDEZ-CORNEJO et al., 2000). No entanto, neste estudo de caso, além da observação do aumento de custo com inseticidas no período de 2012/13 até 2015/16, a redução da perda de produtividade e os preços de mercado do milho segunda safra abaixo da média nacional, não foram suficientes para gerar uma renda ao produtor capaz de cobrir os custos adicionais com a semente *Bt* e controle químico. O fato pode ser constatado pelos resultados do coeficiente B/C, os quais apresentaram valores menores que um em todas as safras desde 2009/10 até 2015/16.

Desta forma, verificou-se que os agricultores que adotaram o plantio de milho transgênico apresentaram níveis de rentabilidade negativos em todo o período das sete safras de estudo. Contudo, a relação B/C apresenta seus valores menores nas três últimas safras, após o período em que foi constatada a falha de controle da tecnologia *Bt*, com a necessidade de 3 aplicações inseticidas na safra de 2013/14.

Para o milho convencional, conforme mostra a Tabela 13, fica evidente que na maioria das safras (2010/11, 2011/12, 2012/13 e 2014/15) o produtor obteve rentabilidade positiva com o cultivo tradicional. Exceto nas safras de 2009/10 e 2015/16, que apresentaram ocorrência de problemas climáticos na região de Goiás interferindo na produção de milho, reduzido sua produtividade, de modo que houve queda na renda do cultivo e prejuízos com essas safras.

Desta forma, verificou-se que os agricultores que adotaram o plantio convencional de milho apresentaram, na maioria dos anos safra, níveis de rentabilidade positivos durante o período das sete safras de estudo.

Tabela 13 - Fluxo de caixa da produção de milho convencional para as safras de 2009/10 até 2015/16 e resultados da análise estática de viabilidade econômica da produção de milho convencional.

Custos da área <i>Bt</i> (R\$/ha)	Anos						
	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Semente	340,03	217,24	329,93	262,88	284,33	350,65	250,00
Inseticida	125,81	40,60	74,07	92,31	85,98	71,24	56,08
Maquinário (Pulverização)	23,04	0,00	2,85	11,14	7,34	5,56	2,75
Mão de Obra	160,67	163,57	183,08	173,14	101,75	61,56	50,92
Outros	1.699,31	1.631,97	1.556,28	1.376,46	1.753,12	1.579,04	1.434,55
Custo Operacional Efetivo	2.348,86	2.053,38	2.146,22	1.915,92	2.232,52	2.068,06	1.794,29
Custo Operacional Efetivo Presente	2.348,86	1.965,71	1.966,86	1.680,84	1.874,98	1.662,70	1.381,00
Benefícios							
Produtividade (sacas/ha)	90,00	80,00	110,00	110,00	110,00	110,00	60,00
Preço real (R\$/saca)	18,47	27,29	23,14	21,38	19,90	20,81	25,00
Receita bruta (R\$/ha)	1.662,30	2.183,28	2.546,17	2.352,79	2.189,33	2.289,87	1.500,00
Receita Bruta Presente	1.662,30	2.090,06	2.333,39	2.064,11	1.838,70	1.841,03	1.154,49
TIR	13%						
B/C	0,71	1,06	1,19	1,23	0,98	1,11	0,84

Fonte: Elaboração própria com base nos dados dos painéis elaborados para a região de Rio Verde (GO).

Nota: A taxa de desconto real utilizada foi de 4,46% a.a.

Quando se analisa a evolução do coeficiente benefício-custo de ambas as tecnologias para cada ano safra, observa-se que, ao longo dos anos, há tendência de queda do benefício líquido da produção *Bt* em relação ao convencional, nas condições de preço e produtividade originais de cada safra. Aqui, verifica-se mais uma evidência de que a resistência pode estar levando à perda de valor da patente e do vigor da tecnologia a campo.

Neste item dos resultados é possível observar que, o nível de 55% de risco de obtenção de inviabilidade econômica, bem como valor médio de $VPL < 0$ e valor médio de $B/C < 1$, quando o produtor não realiza aplicações inseticidas (cenário A), apresentado no item anterior pode ser explicado pelos baixos níveis de preços do milho *Bt*, da região de Rio Verde (GO), que ficam abaixo da média nacional, além de não se ter considerado produtividades diferenciadas entre cultivo *Bt* e convencional, mantendo dados de produtividade para o milho *Bt* abaixo do que se observa em condições reais de campo. Juntos esses dois fatores não são capazes de gerar uma renda capaz de suprir os custos com inseticidas e sementes *Bt*.

5.6 Análise de risco de viabilidade econômica de produção de milho *Bt* e convencional

Os resultados da análise de risco do VPL e B/C da produção de milho *Bt* e convencional para os dados originais das sete safras do painel da propriedade modal de Rio Verde, no qual se comparam as situações de risco de produtividade e de preços para os cultivos com duas tecnologias, por meio do método de Monte Carlo para simulação das variáveis preço e produtividade, encontram-se nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 - Distribuição de probabilidade acumulada de valores do VPL da produção de milho *Bt* e convencional, em propriedades modais de Rio Verde (GO) para 7 anos de estudo.

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados da Figura 27 indicam que, quando se considera produtividades iguais entre milho *Bt* e convencional, eventualmente a produção de milho *Bt* deva possuir maior risco econômico quando comparada à produção convencional. A produção de milho safrinha *Bt* apresentou probabilidade de ter VPL negativo igual a 60%. Já a produção de milho convencional apresentou probabilidade de ter VPL negativo igual a 55%.

Os dados detalhados dos percentis de risco do VPL simulados para a produção de milho *Bt* e convencional, para 7 anos de estudo, relativos à Figura 27, constam da Tabela 22 do Anexo C. Nesta tabela, observa-se que na situação de valores mínimos para preço (R\$ 18,49 por saca 60 Kg) e produtividade (60 sacas/ha), tanto a produção de milho *Bt* quanto a

convencional tornam-se inviáveis economicamente. Em contrapartida, na situação de valores máximos para preço (R\$ 27,27 por saca de 60 Kg) e produtividade (109,92 sacas/ha), a produção de milho torna-se viável economicamente tanto para a tecnologia *Bt* quanto para a tradicional.

De forma geral, verificou-se que a produção do milho *Bt*, nas condições consideradas para Rio Verde – GO, e com base no histórico de preços e produtividades registrados pelos levantamentos do Cepea, torna-se viável economicamente somente quando os preços do grão assumem valores acima de R\$ 23,36 por saca de 60 Kg e produtividade acima de 94,07 sacas por hectare. Da mesma forma a produção de milho convencional torna-se viável economicamente somente quando os preços assumem valores acima de R\$ 23,09/sc e produtividade acima de 92,73 sacas/ha.

Na Figura 28 é possível observar a frequência de ocorrência dos níveis de VPL da produção de milho *Bt* e convencional por meio da simulação de valores aleatórios para preço e produtividade.

Os resultados dos níveis de VPL da Figura 28 indicam que, o maior valor médio do VPL ocorre para a produção de milho convencional (R\$/ha -701,03), vis-à-vis aquele obtido para o milho *Bt* (R\$/ha -875,22). No entanto, para ambas as tecnologias, o valor médio de VPL é negativo, indicando que o agricultor não obterá lucros em qualquer uma das duas situações, quando se consideram valores modais de preço e produtividade semelhantes para milho *Bt* e convencional, nesta região de Rio Verde (GO).

Figura 28 - Distribuição de frequência de valores do VPL da produção de milho *Bt* e convencional, em propriedades modais de Rio Verde (GO) para 7 anos de estudo.

Fonte: Elaboração própria.

Com relação à análise de risco para o indicador econômico Coeficiente benefício custo (B/C), os resultados na Figura 29, também mostram que a produção de milho *Bt* eventualmente possa possuir maior risco econômico que a convencional, quando se considera produtividades e preços semelhantes entre milho *Bt* e convencional.

Figura 29 - Distribuição de probabilidade acumulada de valores do B/C da produção de milho *Bt* e convencional, em propriedades modais de Rio Verde (GO) para 7 anos de estudo.

Fonte: Elaboração própria.

O mapeamento de risco dado pelos percentis na Figura 29 mostra que, na situação de preço e produtividade consideradas neste estudo de caso, a produção de milho *Bt* apresenta 60% de probabilidade de apresentar B/C menor que um, indicando prejuízos econômicos. Já a produção convencional apresenta 55% de probabilidade de apresentar B/C menor que um.

Esses resultados demonstram que, embora haja toda uma discussão em torno dos vários benefícios trazidos pelo uso da tecnologia *Bt*, como possibilidade de redução de perda de produtividade e redução dos custos de produção, pela menor necessidade de aplicações inseticidas, se considerarmos que haja mesma produtividade entre ambos os cultivos, já nos dias atuais a tecnologia *Bt* pode apresentar inviabilidade econômica, e eventualmente pode possuir maiores riscos econômicos quando comparada a produção de milho convencional, o que reforça a ideia da evolução da frequência de lagartas resistentes, bem como o impacto direto causado pela resistência dessas pragas à economia do produtor rural, diminuindo os lucros obtidos com a atividade produtiva do milho *Bt*.

Os dados detalhados dos percentis de risco do coeficiente B/C simulados para a produção de milho *Bt* e convencional, para 7 anos de estudo referentes à Figura 29 são apresentados na Tabela 23 do Anexo C. Nesta tabela, observa-se que, considerando os valores mínimos de preço e produtividade, ou seja, em um cenário pessimista, verifica-se que tanto a produção de milho *Bt* quanto a convencional possui resultados do coeficiente benefício custos menores que um, indicando não haver viabilidade econômica em produzir milho em nenhuma dessas tecnologias.

No entanto, no cenário otimista, de máximos valores para preço e produtividade, ambas as tecnologias apresentam viabilidade econômica, pois neste caso a produtividade e os preços de mercado do milho serão suficientes para gerar uma renda capaz de suprir os custos de produção, gerando lucro ao agricultor.

Na Figura 30 é possível observar a frequência de ocorrência dos níveis de B/C da produção de milho *Bt* e convencional através da simulação de números aleatórios para preço e produtividade. Esses resultados indicam que, o valor médio do índice B/C para a produção de milho convencional (0,96) é muito próximo ao valor médio de B/C para a produção de milho *Bt* (0,95), ambos com valores menores que um. Esses resultados indicam que embora a análise das probabilidades acumuladas do coeficiente B/C tenham demonstrado provável risco superior da produção *Bt* à do convencional (com diferença de 5% entre essas probabilidades), quando se compara a frequência de ocorrência dos valores médios desse índice, nota-se pouca diferença significativa entre a produção de milho *Bt* e convencional.

Figura 30 - Distribuição de frequência de valores do coeficiente B/C da produção de milho *Bt* e convencional, em propriedades modais de Rio Verde (GO) para 7 anos de estudo.

Fonte: Elaboração própria

Assim, visto um exemplo de impacto econômico que a resistência de pragas às culturas *Bt* tem sobre a redução de obtenção de lucro do produtor rural, por meio deste estudo de caso envolvendo a lagarta *S. frugiperda* e a cultura do milho *Bt*; e considerando que a resistência é naturalmente desenvolvida em cultivos transgênicos¹⁸, que se acelera de forma acentuada devido á pressão de seleção (uso contínuo de uma mesma cultura *Bt*), ressalta-se a importância e necessidade do produtor rural adotar Estratégias de Manejo de Resistência (MRI), dentro do manejo integrado de pragas (MIP). Essa é uma medida capaz de retardar a evolução da resistência dessas pragas sobre os cultivos *Bt* a médio e longo prazo, ou seja, antes que a resistência se torne um problema econômico.

Dentre as estratégias do MRI preventivas contra a evolução de resistência de pragas destacam-se: a estratégia de altas doses e adoção de áreas de refúgio, rotação de culturas transgênicas *Bt* e não-transgênicas *Bt*, expressão de múltiplas toxinas *Bt* na mesma planta, expressão de toxinas *Bt* em baixas doses e controle biológico, toxinas com expressão seletiva, dentre outras.

A estratégia de altas doses consiste na produção de uma quantidade/dose suficiente da toxina *Bt* para eliminar mais do que 99% dos indivíduos heterozigotos da população de pragas, ou seja, os indivíduos que possuem uma única cópia do gene para resistência (GEORGHIOU;

¹⁸ Devido à existência de uma variabilidade genética natural de uma dada população inicial da praga, ou seja, pela existência de indivíduos pragas pre-adaptados resistentes.

TAYLOR, 1977; GOULD, 1998). Essa estratégia torna a resistência uma característica funcionalmente recessiva, pois apenas os indivíduos que possuem duas cópias do gene sobrevivem às doses de toxina *Bt* (TABASHNIK e CROFT, 1982). Assim, nas áreas que contêm plantas *Bt*, sobreviverão apenas os homozigotos recessivos, ou seja, os raros portadores de duas cópias do gene para resistência (CAPRIO; SUMMERFORD; SIMS, 2000; TABASHNIK, 1994). Essa estratégia, normalmente, é usada em conjunto com a adoção de áreas de refúgio, principal ferramenta dos programas de MRI, que tem sido eficaz em retardar o aparecimento de resistência de pragas em cultivos *Bt* (BEDIN *et al.*, 2015).

A estratégia do refúgio, conforme comentado na revisão de literatura deste trabalho, consiste em uma área cultivada com plantas não *Bt* em lavouras de milho resistentes a insetos (*Bt*), cuja função é produzir insetos suscetíveis à toxina inseticida, que ao acasalarem com os eventuais indivíduos resistentes provenientes das áreas plantadas com biotecnologia, geram uma prole também suscetível e, portanto, controlada pela tecnologia *Bt*. A principal vantagem da adoção da área de refúgio, é que, nela determinada parcela da população de pragas não é exposta à pressão de seleção, e assim, os insetos podem sobreviver, reproduzir e acasalar-se com os indivíduos sobreviventes da área *Bt* e produzir descendentes suscetíveis, o que é fundamental na durabilidade da tecnologia *Bt*.

É importante ressaltar que algumas características da área de refúgio são importantes para o manejo da resistência, tais como seu tamanho e arranjo, fatores relacionados com a habilidade de dispersão da praga (ILSI/HESI, 1998). O uso de controle químico ou biológico no refúgio também é relevante, pois influencia sua eficiência, alterando o número de indivíduos susceptíveis disponíveis para acasalamento com os resistentes na área da cultura transgênica.

Para a cultura do milho, no Brasil, a recomendação técnica da área de refúgio depende do evento, e varia normalmente entre 5% a 20% de milho convencional plantado na área total, com o intuito de preservar a eficiência da tecnologia do milho transgênico (MONSANTO, 2010). A recomendação é influenciada por vários fatores, dentre eles a eficácia da proteína usada e se o evento possui proteínas piramidadas (LEITE *et al.*, 2011). Outra recomendação técnica é que a área de refúgio deve estar a menos de 800 metros da área a ser plantada com milho *Bt*, que consiste na distância máxima verificada pela dispersão dos adultos de *S. frugiperda* no campo (VILARINHO, 2007). Ressalta-se que o refúgio deve ser plantado com um híbrido convencional de ciclo vegetativo similar e, ao mesmo tempo, e na mesma propriedade do plantio do milho *Bt* (MONSANTO, 2010). Todas essas recomendações visam

permitir o sincronismo entre os cruzamentos dos possíveis adultos sobreviventes na área de milho *Bt* com suscetíveis provenientes da área de refúgio (LEITE *et al.*, 2011).

Por ser uma medida preventiva e permanente, o refúgio deve ser feito todos os anos, em todas as safras. Outra recomendação é que o produtor não considere a área de refúgio para produção, já que esta é uma área somente para produção de pragas. Desse modo, o produtor não deveria realizar mais do que 1 a 2 aplicações inseticidas nessa área, para que não haja pressão de seleção nessa área também.

No entanto, a partir de relatos feitos por produtores às equipes de levantamento de dados do Cepea, de uma forma geral, os mesmos não acham essa estratégia acima tão viável economicamente, já que a área de 10% para o refúgio é considerável, e acaba impactando na obtenção do lucro final. Por esse motivo, o refúgio, ainda não é adotado pela maioria dos produtores de variedades transgênicas, que acreditam que o refúgio trará maiores custos para sua implantação sem um retorno financeiro posterior a curto prazo. Embora os produtores não esperem a mesma lucratividade nas duas lavouras, precisam que o refúgio viabilize, pelo menos, seus custos de produção.

Outro agravante que contribui para a não utilização do refúgio é a obtenção de sementes convencionais para a formação dessas áreas: os produtores que participam dos painéis de levantamento do Cepea relatam, de modo geral, dificuldade em encontrar sementes de milho não transgênico disponível no mercado. Neste aspecto, ressalta-se uma contradição entre a recomendação da indústria biotecnológica para a adoção das áreas de refúgio e a indisponibilidade ou dificuldade de se obter sementes convencionais no mercado.

As estratégias preventivas descritas acima podem ser combinadas entre si, como a estratégia alta dose/refúgio estruturado com híbridos expressando múltiplas toxinas, por exemplo. Agentes de controle biológico como parasitoides do gênero *Trichogramma*, baculovírus, fungos entomófagos ou ainda a liberação de indivíduos estéreis das pragas alvo podem ser utilizados na área da cultura transgênica apenas, quando o híbrido expressar baixa dose da toxina (SCHÜTTE, 2000).

No caso da combinação de variedades que expressam as toxinas em altas doses e adoção de refúgio permite-se que maiores opções de manejo de resistência de insetos sejam adotadas, como a utilização de áreas de refúgio de menor tamanho, as quais são mais facilmente implementadas, em comparação a áreas de refúgio para baixa dose (MAIA, 2003; STORER *et al.*, 2003). Nesta situação, os insetos homozigotos resistentes (RR) da cultura *Bt* acasalam-se com os insetos homozigotos suscetíveis (SS) da área de refúgio e o heterozigoto (RS) resultante do acasalamento é morto pela alta dose da proteína inseticida expressa na planta *Bt* (BRAVO e

SOBERÓN, 2008). O resultado final é uma baixa sobrevivência de insetos heterozigotos (RS), que no início do processo de evolução da resistência são os principais carreadores dos alelos da resistência (GOULD, 1998).

Existem ainda outras formas de se realizar o manejo da resistência, como por meio da aplicação de rotação de culturas, que consiste na alternância planejada de diferentes eventos de transgenias da mesma espécie, ou entre diferentes espécies hospedeiras ou não hospedeiras da praga alvo em determinada área (MAIA, 2003), para também diminuir a pressão de seleção e aumentar a longevidade da tecnologia *Bt*. Essa prática reduz a fonte de inóculo de determinadas pragas, promovendo a redução da população inicial desses insetos-praga na cultura *Bt*.

Há ainda a possibilidade de se explorar o custo adaptativo da praga resistente em programas de manejo da resistência. O fato pode ser explicado detalhando uma determinada característica da resistência, ou seja, os indivíduos resistentes apresentam um custo adaptativo, que faz destes indivíduos menos aptos que os susceptíveis quando o produto químico ou proteína inseticida não é utilizada. Este menor valor adaptativo dos indivíduos resistentes pode estar associado a vários fatores, tais como: uma menor viabilidade total, menor fecundidade, maior tempo para o desenvolvimento, menor competitividade para o acasalamento, maior susceptibilidade aos inimigos naturais, etc. Desta forma, em situações em que a frequência de resistência diminui na ausência da pressão seletiva (caso de resistência instável), esta instabilidade pode ser explorada em programas de manejo de resistência.

Portanto, quando um determinado produto não é utilizado por um certo período ou quando há imigração de indivíduos susceptíveis de áreas não tratadas (refúgios) para áreas tratadas, pode ocorrer o restabelecimento da susceptibilidade e diluição da resistência (GEORGHIOU, 1972; DENNEHY; NYROP; MARTINSON, 1990; ROUSH; MCKENZIE, 1987; ROUSH; DALY, 1990).

Destaca-se também a importância do uso de doses corretas dos inseticidas, conforme recomendação do fabricante, pois o uso contínuo e em excesso de produtos inseticidas constitui outro fator capaz de exercer pressão de seleção sobre os indivíduos pragas, sendo capaz de contribuir para a evolução de insetos resistentes.

Resumidamente, ressalta-se que todas essas estratégias do MR se tornam importantes economicamente não só para o produtor rural, mas também para a indústria agroquímica e biotecnológica.

Ao produtor a importância econômica de refrear a evolução da resistência de pragas esta, principalmente, na redução dos riscos de obter prejuízos com sua atividade produtiva

agrícola. À indústria biotecnológica, a importância econômica está na manutenção da eficiência da tecnologia *Bt* para o controle de pragas por um maior período de tempo, o que corresponde à obtenção de maiores lucros advindos da venda dessa tecnologia. Além de evitar prejuízos ocasionados pela perda da patente dessa tecnologia e reduzir custos pela menor necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias eficientes no controle de pragas, que substituam aquelas que perderam sua eficiência pelo desenvolvimento da resistência dessas pragas.

Para o sucesso de todo e qualquer programa de manejo de resistência é fundamental que haja uma boa conscientização de todos os atores sociais, desde os produtores rurais, consumidores e até a indústria agroquímica, de que a gestão da resistência é a melhor opção para maiores retornos socioeconômicos durante todo o processo de produção.

Portanto, é fundamental que o produtor tome ações condizentes com o programa de Manejo Integrado de Pragas e uma boa gestão da resistência, pois esta será uma boa opção para que seus lucros sejam maximizados ao longo do tempo (DENHOLM e ROWLAND, 1992), uma vez que a adesão a esses programas, em geral, permitem aumentar a rentabilidade do produtor, já que estas são tecnologias que buscam manter o ecossistema o mais próximo possível do equilíbrio, colaborando com a sustentabilidade da lavoura e a preservação do meio ambiente a longo prazo, e evitando o uso abusivo de produtos agroquímicos. Todas as ações de MIP contribuem também para a preservação do surgimento de pragas resistentes, permitindo assim o aumento da rentabilidade ao produtor rural.

Portanto é fundamental que haja acesso a informação e que se promova a educação dos produtores como ferramentas fundamentais para a implementação de qualquer programa de gestão da resistência (OMOTO *et al.*, 1995). Para tanto, as informações devem ser amplamente acessíveis e compreensíveis aos produtores (STAETZ, 2012).

Daí a importância do estudo econômico, ao mensurar os custos gerados pela resistência, o qual irá fornecer maior conscientização do produtor sobre grande o impacto que este problema gera para a economia e sociedade, visando fazê-los aderir aos programas de MIP, além de contribuir para a preservação da eficácia dos pesticidas e tecnologia *Bt* já existentes no mercado.

6 CONCLUSÕES

A resistência de pragas agrícolas certamente tem efeitos e implicações negativas econômicas, sociais, ambientais e institucionais sobre os diversos atores envolvidos na produção agrícola, como o produtor rural, indústria agroquímica e biotecnológica e o próprio consumidor final. Um dos impactos mais destacados na literatura econômica é o que tange ao lucro do produtor rural, seja pelo potencial que a resistência tem de aumentar os custos de produção, com inseticidas e maquinário agrícola, ou pela perda de produção devido ao ataque das pragas nas lavouras. É neste contexto que se insere o tema aqui examinado, da análise econômica do impacto da resistência sobre o lucro do produtor rural, por meio do método de análise de viabilidade econômica da produção de milho *Bt*, sob condições de evolução da resistência de pragas.

Neste sentido, buscando avaliar a viabilidade econômica do cultivo de milho *Bt* em um contexto de evolução de resistência de lagartas *Spodoptera frugiperda* a esta tecnologia, toma-se como estudo de caso os dados de custos, preço e produtividade coletados pelo Cepea, utilizando o método de painel para obtenção de propriedades modais representativas das regiões, no caso aqui avaliado, para a Região de Rio Verde (GO). A viabilidade econômica, com robustez incrementada pela incorporação de simulações pelo método de Monte Carlo, foi adotada para avaliar o risco econômico sob condições de aumento das pulverizações inseticidas, assumidas como decorrência do aumento da frequência de lagartas resistentes à tecnologia *Bt*.

Os indicadores de risco escolhidos consistem no VPL (valor presente líquido) e no B/C (coeficiente de benefício custo), considerados dois cenários e três simulações, todos fundamentados em dados históricos de custos de produção modais, das últimas sete safras agrícolas de milho em Rio Verde (GO). No primeiro cenário, considerou-se uma condição eficiente de produção de milho *Bt*, com baixa frequência de pragas resistentes e, portanto, sem ocorrência de danos econômicos e sem a necessidade de aplicações inseticidas para o controle da lagarta *S. frugiperda*. No segundo cenário considerou-se uma produção de milho *Bt*, sob aumento da frequência de pragas resistentes e, portanto, com ocorrência de danos econômicos, pelo aumento de custos com inseticidas e maquinário, situação examinada a partir de três simulações, denominadas 1B, 2B e 3B, respectivamente, incorporando 01, 02 e 03 aplicações inseticidas.

Os resultados indicaram que, de fato, a resistência possui um impacto negativo sobre o lucro do produtor rural no médio prazo, já que se nota uma maior queda da relação benefício

custo do cultivo do milho *Bt* quando comparado à queda no coeficiente benefício custo do milho convencional, ao longo dos 7 anos da análise estática. Esta análise, que não emprega a simulação de Monte Carlo, reflete as condições de preços e custos vigentes (trazidos a valores de 2015) entre as safras de 2009/10 a 2015/16, ao longo das quais, conforme a literatura técnica e as evidências numéricas, tem seu desempenho afetado pela maior presença de lagartas resistentes ao transgênico.

A redução da relação B/C no milho *Bt* mais acentuada que no milho convencional, pode ser explicada pelo aumento dos custos de produção decorrentes do maior número de aplicações com inseticida ao longo dessas sete safras, dada a queda de eficiência da cultura *Bt* para o controle de pragas devido à evolução da resistência das mesmas. Na análise de risco para VPL e B/C, conduzida por meio de simulações de preço e produtividade pelo Método de Monte Carlo, evidenciou-se que há um provável risco econômico na produção de milho *Bt* maior do que na produção de milho convencional, com diferença de 5% de probabilidade, considerados os dados de campo, entre as safras de 2009/10 e 2015/16. No entanto, analisando a distribuição de frequência do índice B/C, observa-se uma diferença pouco significativa entre produção de milho *Bt* e convencional.

A longo prazo, também evidenciou-se que a evolução da resistência possui um impacto negativo sobre o lucro do produtor rural, por meio da análise de risco do VPL e B/C para a produção de milho *Bt* em função do aumento do número de aplicações inseticidas simuladas nos cenários 1B, 2B e 3B. Nestas avaliações, o mapeamento de risco dado pelos percentis da análise de risco, conduzida pelas simulações aleatórias de valores de preços e produtividade pelo método de Monte Carlo, para um período de 10 anos de projeção, tendo como referência os valores gastos e os preços médios reais baseados nos períodos anteriores, evidenciou-se que o milho *Bt* apresenta maior grau de prejuízo à medida que aumentam as aplicações inseticidas. Neste caso, os resultados mostram que, com a elevação da frequência de lagartas resistentes, há maior probabilidade de o valor presente líquido (VPL) ser negativo e do coeficiente benefício custo (B/C) ser menor do que 1. Assim, este resultado aponta que é maior o risco de inviabilidade econômica dessa atividade nas condições estudadas.

De forma geral, verificou-se que a partir do momento em que a resistência de pragas se estabelece no cultivo de plantas *Bt*, em 70% das simulações encontrou-se uma situação de inviabilidade econômica da produção. Nota-se que a análise de risco econômico está vinculada à probabilidade de o produtor não obter lucros com o cultivo do milho. Conforme a frequência de lagartas resistentes aumenta, exigindo uso mais intensivo de inseticidas, a probabilidade dessa cultura tornar-se inviável economicamente se eleva.

Além dos produtores, a indústria agroquímica e biotecnológica e os próprios consumidores também podem ser influenciados negativamente pela evolução de pragas resistentes, o que pode ser objeto de estudo para trabalhos futuros. Além disso, muitas outras pragas e culturas podem ser alvo de estudos como este. O Brasil tem sido considerado, segundo se comenta nos eventos técnicos sobre resistência, um país em que rapidamente as patentes se perdem pela quebra da potência tecnológica. Um dos principais motivos, no caso estudado, é a contínua sucessão de cultivos *Bt* sem adoção da sua rotação com cultivos não *Bt*. Neste caso específico, cabe avançar um pouco mais na coleta de dados e em aprimoramentos metodológicos, de modo a que seja possível aproximar-se da quantificação das perdas auferidas também pela indústria química e genética, na medida em que o milho *Bt* perde o seu vigor no controle das lagartas.

Este trabalho conclui que a evolução da resistência de pragas é de fato um grande desafio para o uso de culturas que expressam proteínas *Bt*. Analisando-se criticamente as possibilidades de atenuar as perdas que a resistência, de forma “silenciosa”, acarreta na produção do milho, nota-se que há medidas que podem ser preconizadas e adotadas pelos produtores, tanto na situação preventiva quanto para mitigar os prejuízos já concretos do processo. Um exemplo é a adoção do Manejo da Resistência de Insetos (MRI).

As tecnologias *Bt* podem ter sua eficácia comprometida mais rapidamente na ausência da implementação de um programa efetivo de Manejo da Resistência de Insetos (MRI), isto é, de um conjunto de medidas que visam prevenir ou retardar a seleção de indivíduos resistentes, como por exemplo as áreas de refúgio.

Atualmente, o baixo uso de refúgio na região de Rio Verde decorre principalmente da crença do produtor de que o refúgio acarretará maiores custos para sua implantação sem garantir um retorno financeiro posterior a curto prazo. Outro fator que parece relevante, conforme relatos de campo, é a dificuldade em se encontrar sementes de milho não transgênico disponíveis no mercado, e com alta produtividade. Este elemento, em particular, parece apontar para uma contradição entre a recomendação da indústria biotecnológica para a adoção das áreas de refúgio e a indisponibilidade ou dificuldade de se obter sementes convencionais no mercado. Contradição, na medida em que, algumas das empresas engajadas no desenvolvimento da genética transgênica também atuam na produção de agroquímicos.

Nesse escopo, há uma série de aspectos que poderiam ser discutidos, mas que não fazem parte do escopo principal deste trabalho, tais como a estrutura e o perfil da indústria de

produção das sementes transgênicas e de agroquímicos e que podem fundamentar discussões sobre a necessidade de integração e alinhamento das estratégias dessas indústrias.

Neste aspecto, ressalta-se sobre a importância da sensibilização do produtor rural, pelo menos pelo aspecto econômico, para a adoção do plantio de refúgio, considerado atualmente como a principal ferramenta dos programas de MRI, dada a sua eficácia em retardar o aparecimento da resistência, de acordo com a literatura. Neste sentido, é possível propor ainda que se estude a viabilidade econômica da implantação das áreas de refúgio como método de retardar a evolução da resistência de pragas ao cultivo *Bt*, para a economia do produtor rural, como forma de incentivo para que este método seja efetivamente adotado pelos agricultores, já que no presente trabalho ficou evidenciado que a resistência apresenta impactos econômicos na rentabilidade da produção de milho que não podem ser ignorados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. R.; CAVALCANTE, R. D.; SORDI, G. Ensaio com inseticidas modernos no combate à lagarta-do-cartucho *Laphygna frugiperda* (Smith, 1797) e técnica de aplicação. **O Biológico, São Paulo**, v. 30, n. 5, p. 111–114, 1964.
- ALSTAD, D. N. ; ANDOW, D. A. Managing the evolution of insect resistance to transgenic plants. *Science, Washington*, v. 268, p. 1394, 1995.
- ALVES, L. R. *et al.* Cultivo de milho geneticamente modificado no Brasil: estrutura de custos, rentabilidades e diferenciais com os sistemas convencionais. **Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER)(Org.). 50º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural: SOBER: Agricultura e desenvolvimento rural com sustentabilidade**, 2012.
- ALVES, L. R. A.; GOTTARDO, L. C. B. “**Comparação de custos de algodão entre plantios nos sistemas adensado e Convencional.**” CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 7, 2009, Foz do Iguaçu. Sustentabilidade da cotonicultura Brasileira e Expansão dos Mercados. **Anais...**Campina Grande: Embrapa, 2009
- AMBROSI, I. *et al.* Lucratividade e risco de sistemas de produção de grãos combinados com pastagens de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 10, p. 1213–1219, out. 2001.
- ANDOW, D. The risk of resistance evolution in insects to transgenic insecticidal crops. **Collection of Biosafety Reviews**, v. 4, p. 142–199, 2008.
- ANDOW, D. A.; ALSTAD, D. N. F2 Screen for Rare Resistance Alleles. **Journal of Economic Entomology**, v. 91, n. 3, p. 572–578, 1 jun. 1998.
- BATES, S. L. *et al.* Insect resistance management in GM crops: past, present and future. **Nature Biotechnology**, v. 23, n. 1, p. 57–62, 1 jan. 2005.
- BEATY, B. J.; MARQUARDT, W. C. **The biology of disease vectors**. 1. ed. Niwot: University Press of Colorado, 1996.
- BEDIN, F. A. *et al.* Eficiência de eventos transgênicos de resistência a insetos em soja e milho. p. 201–214, 2015.

BENBROOK, C. M. When Does It Pay to Plant Bt Corn? Farm-Level Economic Impacts of Bt Corn, 1996-2001 What's in it for farmers? When Does It Pay to Plant Bt Corn? Introduction. 2001.

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, p. e0140130, 16 out. 2015.

BERNARDI, O. *et al.* Resistência de Insetos-Praga a Plantas Geneticamente Modificadas Introdução. n. October 2015, p. 181–208, 2011.

BERNARDI, O.; AMADO, D.; *et al.* Baseline susceptibility and monitoring of Brazilian populations of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) to Vip3Aa20 insecticidal protein. **Journal of economic entomology**, v. 107, n. 2, p. 781–90, abr. 2014.

BERNARDI, O.; DOURADO, P. M.; *et al.* High levels of biological activity of Cry1Ac protein expressed on MON 87701 × MON 89788 soybean against *Heliothis virescens* (Lepidoptera:Noctuidae). **Pest Management Science**, v. 70, n. 4, p. 588–594, abr. 2014.

BERNARDI, O. *et al.* Frequency of resistance to Vip3Aa20 toxin from *Bacillus thuringiensis* in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) populations in Brazil. **Crop Protection**, v. 76, p. 7–14, 1 out. 2015.

____. **Manejo da Resistência de Insetos a Plantas Bt**. 1^a ed. Engenheiro Coelho / SP: PROMIP, 2016.

BLANK, L.; TARQUIN, A. **Engenharia Econômica**. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

BORNIA, A. C. **Mensuração das perdas dos processos produtivos : uma abordagem metodologica de controle interno**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

BRAVO, A.; SOBERÓN, M. How to cope with insect resistance to Bt toxins? **Trends in Biotechnology**, v. 26, n. 10, p. 573–579, out. 2008.

BRAVO, A.; SOBERÓN, M.; GILL, S. *Bacillus thuringiensis*: Mechanisms and Use. 2005.

BRIGHAM, E. F. **Fundamentals of financial management**. 5. ed. Chicago: The Dryden Press, 1989.

BUARQUE, C. **Avaliação econômica de projetos uma apresentação didática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1986.

- CAMILLA, C.; NEPPL, B. Managing resistance to *Bacillus thuringiensis* toxins. 2000.
- CAPRIO, M. A.; SUMMERFORD, D. V.; SIMS, S. R. Evaluating transgenic plants for suitability in pest and resistance management programs. In: LACEY, L.A.; KAYA, H.K. (Ed.). *In: Field manual of techniques in invertebrate pathology*. Dordrecht: Kluwer Academic. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000. p. 805–828.
- CARLSON, G. A.; WETZTEIN, M. “Pesticides and Pest Management.” In *Agricultural and Environmental Resource Economics*, eds., G. A. Carlson, D. Zilberman, and J. A. Miranowski. p. 268–318, 1993.
- CARNEIRO, A. A. *et al.* Milho Bt: teoria e prática da produção de plantas transgênicas resistentes a insetos-praga. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. p. 25, 2009.
- CARRIÈRE, Y.; CRICKMORE, N.; TABASHNIK, B. E. Optimizing pyramided transgenic Bt crops for sustainable pest management. **Nature Biotechnology**, v. 33, n. 2, p. 161–168, 19 mar. 2015.
- CASAROTTO FILHO, N. .; KOPITTKKE, B. H. **Análise de Investimentos**. 9. ed. São Pulo: Atlas, 2006.
- CASELEY, J. C.; CUSSANS, G. W.; ATKIN, R. K. Herbicide resistance in weeds and crops. p. 513, 1991.
- CÉLERES. **2º levantamento de adoção da biotecnologia agrícola no Brasil, safra 2016/17. Informativo Biotecnologia.Céleres**. Disponível em: <<http://www.celeres.com.br/2o-levantamento-de-adocao-da-biotecnologia-agricola-no-brasil-safra-201617/>>. Acesso em: 4 jan. 2018.
- CEPEA. **Metodologia - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/metodologia.aspx>>. Acesso em: 9 jan. 2018.
- CONTADOR, C. R. **Avaliação social de projetos**. São Paulo: Atlas, 1981.
- CONTADOR, C. R. **Projetos sociais – avaliação e prática**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- COSTA, L. G. T. A.; AZEVEDO, M. C. L. **Análise Fundamentalista**. Rio de Janeiro: FGV/EPGE, 1996.

COSTA, M. A. G. *et al.* Eficácia de diferentes inseticidas e de volumes de calda no controle de Spodoptera frugiperda nas culturas do milho e sorgo cultivados em várzea. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 35, n. 6, p. 1234–1242, 2005.

CROFT, B. A.; BAAN, H. E. VAN DE. Ecological and genetic factors influencing evolution of pesticide resistance in tetranychid and phytoseiid mites. **Experimental & Applied Acarology**, v. 4, n. 3, p. 277–300, jun. 1988.

CROW, J. F. Genetics of Insect Resistance to Chemicals. **Annual Review of Entomology**, v. 2, n. 1, p. 227–246, jan. 1957.

CRUZ, I. A lagarta-do-cartucho na cultura do milho. 18 ago. 1995.

CTNBIO. Comissão Técnica Nacional de Biossegurança. 2007. Liberação comercial de milho geneticamente modificado resistente a insetos evento MON810. In Parecer Técnico N 1.100/2007. 2007.

____. Comissão Técnica Nacional de Biossegurança. 2008. Liberação comercial de milho geneticamente modificado resistente a insetos da ordem lepidoptera e pragas do milho, evento TC1507. In Parecer Técnico N 1679/2008. 2008.

CURTIS, C. F. Theoretical models of the use of insecticide mixtures for the management of resistance. **Bulletin of Entomological Research**, v. 75, n. 02, p. 259, 10 jun. 1985.

DEBLITZ, C. The International Farm Comparison Network (IFCN) - bridging the gap between farmers, science and policy. Federal Agricultural Research Centre (FAL). 2005.

DENHOLM, I.; ROWLAND, M. W. Tactics for Managing Pesticide Resistance in Arthropods: Theory and Practice. **Annual Review of Entomology**, v. 37, n. 1, p. 91–112, jan. 1992.

DENNEHY, T. J.; NYROP, J. P.; MARTINSON, T. E. Characterization and exploitation of instability of spider mite resistance to acaricides. In: Green, M. B., Moberg, W. K. & Lebaron, H. [eds.], Managing resistance to agrochemicals: fundamental and practical approaches to combating resistance. Washington. p. 77–91, 23 fev. 1990.

DHURUA, S.; GUJAR, G. T. Field-evolved resistance to Bt toxin Cry1Ac in the pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae), from India. **Pest Management Science**, v. 67, n. 8, p. 898–903, 1 ago. 2011.

DOBZHANSKY, T. **Genetics and the origin of species**. [s.l.] Columbia University Press, 1951.

DOSSA, D. *et al.* **Aplicativo com análise de rentabilidade para sistemas de produção de**

florestas cultivadas e de grãos. Colombo:Embrapa, 2000.

DUARTE, J. DE O. Effects of the Biotechnology and Intellectual Property Right Law in the Seed Industry. 2001.

DUARTE, J. DE O.; GARCIA, J. C.; CRUZ, J. C. Aspectos econômicos da produção de milho transgênico. **Circular Técnica Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas**, n. 127, p. 1–15, 2009.

EMBRAPA. **Pesquisa alerta: manejo inadequado na lavoura pode levar à resistência de pragas – Sociedade Nacional de Agricultura.** Disponível em: <<http://www.sna.agr.br/pesquisa-alerta-manejo-inadequado-na-lavoura-pode-levar-a-resistencia-de-pragas/>>. Acesso em: 27 mar. 2018.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Produção de milho. **Guaíba: Agropecuária**, p. 360, 2000.

FAO. Glossary of phytosanitary terms. **Secretariat of the international plant protection convencion of the food and agriculture organization (FOA) of the United Nations. International standarts for phytoosanitary measures ISPM n.5, Secretariat of the International Plant Protection Convencion.** , v. 5, p. 23, 2006.

FARIAS, J. R. *et al.* Geographical and Temporal Variability in Susceptibility to Cry1F Toxin From *Bacillus thuringiensis* in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) Populations in Brazil. **Journal of Economic Entomology**, v. 107, n. 6, p. 2182–2189, 1 dez. 2014.

FARIAS, J. R. *et al.* Frequency of Cry1F resistance alleles in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **Pest Management Science**, v. 72, n. 12, p. 2295–2302, 1 dez. 2016.

FARO, C. DE. **Engenharia econômica: elementos.** Rio de Janeiro: APEC, , 1972.

FERNANDEZ-CORNEJO, J. *et al.* Genetically engineered crops for pest management in US agriculture: farm level benefits, USDA/ERS 2000. **Agricultural Economics Report**, n. 789, p. 23, 2000.

FERRÉ, J.; RIE, J. VAN. Biochemistry and genetics of insect resistance to *Bacillus thuringiensis*. **Annual Review of Entomology**, v. 47, n. 1, p. 501–533, jan. 2002.

FFRENCH-CONSTANT, R. H.; DABORN, P. J.; GOFF, G. LE. The genetics and genomics of insecticide resistance. **Trends in Genetics**, v. 20, n. 3, p. 163–170, 1 mar. 2004.

FFRENCH-CONSTANT, R. H.; ROUSH, R. T. Resistance Detection and Documentation: The

Relative Roles of Pesticidal and Biochemical Assays. *In: Pesticide Resistance in Arthropods*. Boston, MA: Springer US, 1990. p. 4–38.

FITT, G. P. *et al.* Resistance risks of Bt cotton and their management in Brazil. *IN: HILBECK, A. ANDOW, D.A e FONTES, E.M.G. (Eds.). Environmental risk assessment of genetically modified organisms: Methodologies for assessing Bt cotton in Brazil*. Cambridge: CABI Publishing., *In: Environmental risk assessment of genetically modified organisms. Volume 2: methodologies for assessing Bt cotton in Brazil*. Wallingford: CABI, 2006. p. 300–345.

FORCADA, C. *et al.* Resistance to *Bacillus thuringiensis* Cry1Ac toxin in three strains of *Heliothis virescens*: Proteolytic and SEM study of the larval midgut. **Archives of Insect Biochemistry and Physiology**, v. 42, n. 1, p. 51–63, set. 1999.

FRIZZONE, J. A. *et al.* para a região Norte do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Maringá**, v. 23, n. 5, p. 1131–1137, 2001.

GASLENE, A.; FENSTERSEIFER, J. E.; LAMB, R. Decisões de investimentos da empresa. **Revista de Administração de Empresa**, v. 41, p. 295, 1999.

GASSMANN, A. J. *et al.* Field-Evolved Resistance to Bt Maize by Western Corn Rootworm. **PLoS ONE**, v. 6, n. 7, p. e22629, 29 jul. 2011.

GEORGHIOU, G. P. The Evolution of Resistance to Pesticides. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 3, n. 1, p. 133–168, 28 nov. 1972.

GEORGHIOU, G. P. Management of Resistance in Arthropods. *In: Pest Resistance to Pesticides*. Boston, MA: Springer US, 1983. p. 769–792.

GEORGHIOU, G. P.; TAYLOR, C. E. Genetic and Biological Influences in the Evolution of Insecticide Resistance. **Journal of Economic Entomology**, v. 70, n. 3, p. 319–323, 1 jun. 1977.

GIANESSI, L. P.; CARPENTER, J. E. Agricultural Biotechnology: Insect Control Benefits. 1999.

GITMAN, L. **Princípios de administração financeira**. 7. ed. São Paulo: Harbra, 2002.

GORDDARD, R. J.; PANNELL, D. J.; HERTZLER, G. AN OPTIMAL CONTROL MODEL FOR INTEGRATED WEED MANAGEMENT UNDER HERBICIDE RESISTANCE*. **Australian Journal of Agricultural Economics**, v. 39, n. 1, p. 71–87, 1 abr. 1995.

GOUFFON, C. *et al.* Binding Sites for *Bacillus thuringiensis* Cry2Ae Toxin on Heliothine Brush Border Membrane Vesicles Are Not Shared with Cry1A, Cry1F, or Vip3A Toxin. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 77, n. 10, p. 3182–3188, 15 maio 2011.

GOULD, F. *et al.* Broad-spectrum resistance to *Bacillus thuringiensis* toxins in *Heliothis virescens*. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 89, n. 17, p. 7986, 1992.

GOULD, F. Potential and problems with high-dose strategies for pesticidal engineered crops. **Biocontrol Science and Technology**, v. 4, n. 4, p. 451–461, jan. 1994.

____. Selection and Genetic Analysis of a *Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae) Strain with High Levels of Resistance to *Bacillus thuringiensis* Toxins. **Journal of Economic Entomology**, v. 88, n. 6, p. 1545–1559, 1 dez. 1995.

____. Sustainability of Transgenic Insecticidal Cultivars: Integrating Pest Genetics and Ecology. **Annual Review of Entomology**, v. 43, n. 1, p. 701–726, 28 jan. 1998.

GRAFIUS, E. Economic Impact of Insecticide Resistance in the Colorado Potato Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) on the Michigan Potato Industry. **Journal of Economic Entomology**, v. 90, n. 5, p. 1144–1151, 1 out. 1997.

GUERRA, A.; SILVA, D.; FRANCISCHINI, R. SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE MILHO SAFRINHA EM GOIÁS. **Embrapa**, 2013.

GUTIERREZ, A. P.; REGEV, U.; SHALIT, H. An Economic Optimization Model of Pesticide Resistance: Alfalfa and Egyptian Alfalfa Weevil—an Example. **Environmental Entomology**, v. 8, n. 1, p. 101–107, 1 fev. 1979.

HEMINGWAY, J.; RANSON, H. Insecticide Resistance in Insect Vectors of Human Disease. **Annual Review of Entomology**, v. 45, n. 1, p. 371–391, jan. 2000.

HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, C. S. *et al.* Shared Midgut Binding Sites for Cry1A.105, Cry1Aa, Cry1Ab, Cry1Ac and Cry1Fa Proteins from *Bacillus thuringiensis* in Two Important Corn Pests, *Ostrinia nubilalis* and *Spodoptera frugiperda*. **PLoS ONE**, v. 8, n. 7, p. e68164, 5 jul. 2013.

HOQUE, Z. *et al.* **An approach to modelling and evaluating alternative management strategies for insecticide resistance in the Australian cotton industry** (Australian Agricultural and Resource Economics Society, Ed.)Conference (45th), January 23-25, 2001. **Anais...**Adelaide: 2001

HORIKOSHI, R. J.; BERNARDI, D.; *et al.* Effective dominance of resistance of *Spodoptera frugiperda* to Bt maize and cotton varieties: implications for resistance management. **Scientific Reports**, v. 6, 2016.

HORIKOSHI, R. J. **Dominância funcional e monitoramento da resistência de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) a tecnologias Bt no Brasil.** [s.l.]

Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 29 fev. 2016.

HORIKOSHI, R. J.; BERNARDI, O.; *et al.* Near-Isogenic Cry1F-Resistant Strain of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) to Investigate Fitness Cost Associated With Resistance in Brazil. **Journal of Economic Entomology**, v. 109, n. 2, p. 854–859, abr. 2016.

HOY, C. W.; HEAD, G. P.; HALL, F. R. SPATIAL HETEROGENEITY AND INSECT ADAPTATION TO TOXINS. **Annual Review of Entomology**, v. 43, n. 1, p. 571–594, 28 jan. 1998.

HUANG, F. *et al.* Cry1F Resistance in Fall Armyworm *Spodoptera frugiperda*: Single Gene versus Pyramided Bt Maize. **PLoS ONE**, v. 9, n. 11, p. e112958, 17 nov. 2014.

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**, v. 140, n. 1, p. 1–16, 1 jul. 2011.

HUANG, F.; LEONARD, B. R.; ANDOW, D. A. Sugarcane Borer (Lepidoptera: Crambidae) Resistance to Transgenic *Bacillus thuringiensis* Maize. [http://dx.doi.org/10.1603/0022-0493\(2007\)100\[164:SBLCRT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1603/0022-0493(2007)100[164:SBLCRT]2.0.CO;2), 14 jan. 2007.

IEAG. INSTITUTO DE ESTUDOS DO AGRONEGÓCIO. **O Futuro da Soja Nacional – Impactos Sócioeconômicos da Ferrugem Asiática na Cadeia da Soja nos próximos dez anos**, 2015. Disponível em: <<http://www.abag.com.br/media/images/0-futuro-da-soja-nacional---ieag---abag.pdf>>

IKEDA, V. Y.; OSAKI, M.; ALVES, L. R. A. **Análise econômica da introdução da soja na área de pousio do arroz irrigado de Camaquã (RS) - safra 2011/12** Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Anais...Belém/PA: Sober,. **Anais...2013** Disponível em: <<https://www.escavador.com/sobre/5296654/victor-yoiti-ikeda>>. Acesso em: 19 jul. 2018.

ILSI. INTERNATIONAL LIFE SCIENCE INSTITUTE/ HESI – HEALTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE INSTITUTE. An evaluation of the insect resistance management in Bt field corn: a science based framework for risk assessment and risk management: report of an expert panel. Washington: ILSI Press,. p. 78, 1998.

IMEA. **Estimativa do impacto das aplicações extras de inseticidas no custo de produção**

do milho na safra 2013/14 em Mato Grosso. Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. Mato Grosso, 2014.

JAMES, C. i s a a Global status of Commercialized biotech/GM Crops: 2011 Global area of bioteCh Crops Million hectares (1996-2011). 2011.

JEAN, W. H. On multiple rates of return. **The Journal of Finance**, v. 23, n. 1, p. 187–191, 1 mar. 1968.

KAMIEN, M. I.; SCHWARTZ, N. L. **Dynamic optimization : the calculus of variations and optimal control in economics and management**. 2. ed. Mineola, New York: Dover Publications, Inc, 1991.

KANEKO, F. H. *et al.* Análise econômica do milho em função da inoculação com Azospirillum, fontes e doses de n em cobertura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 2, p. 202–216, 21 jul. 2016.

KNIGHT, A. L.; NORTON, G. W. Economics of Agricultural Pesticide Resistance in Arthropods. **Annual Review of Entomology**, v. 34, n. 1, p. 293–313, 28 jan. 1989.

KOTCHEN, M. J. "Incorporating resistance in pesticide management: a dynamic regional approach." **Regional Sustainability. Physica-Verlag HD**, p. 126–135, 1999.

KUNZ, S. E.; KEMP, D. H. Insecticides and acaricides: resistance and environmental impact. **Rev. sci. tech. Off. int. Epiz**, v. 13, n. 4, p. 1249–1286, 1994.

LABBE, P.; LENORMAND, T.; RAYMOND, M. On the worldwide spread of an insecticide resistance gene: a role for local selection. **Journal of Evolutionary Biology**, v. 18, n. 6, p. 1471–1484, 12 out. 2005.

LAPPONI, J. C. Projetos de investimento na empresa. Rio de Janeiro: Elsevier. 2007.

LAXMINARAYAN, R. **Battling resistance to antibiotics and pesticides : an economic approach**. 1. ed. Washington, DC: Resources for the Future, 2003.

LEITE, N. A. . *et al.* O Milho Bt no Brasil: a Situação e a Evolução da Resistência de Insetos. **Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo**, p. 46, 2011.

LI, X.; SCHULER, M. A.; BERENBAUM, M. R. Molecular Mechanisms of Metabolic Resistance to Synthetic and Natural Xenobiotics. **Annual Review of Entomology**, v. 52, n. 1, p. 231–253, jan. 2007.

LIMA, M. L.; PEIXOTO, F. VIABILIDADE FINANCEIRA DA PRODUÇÃO DE MILHO (ZEA MAYS L.) SOB O MANEJO INTEGRADO DE PRAGAS NA CHAPADA DO APODI, EM LIMOIEIRO DO NORTE/CE. **Rev. Econ. NE, Fortaleza**, v. 48, n. 2, p. 85–99, 2017.

LINDQUIST, J. L.; KROPFF, M. Applications of an Ecophysiological Model for Irrigated Rice (*Oryza sativa*)-*Echinochloa* Competition. **Source: Weed Science**, v. 44, n. 1, p. 52–56, 1996.

LIU, Y.-B. *et al.* Genetics of Pink Bollworm Resistance to *Bacillus thuringiensis* Toxin Cry1Ac. **Journal of Economic Entomology**, v. 94, n. 1, p. 248–252, 1 fev. 2001.

LIVINGSTON, M.; CARLSON, G.; FACKLER, P. Efficient Bt refuge policies. **Proceedings Beltwide Cotton Conferences**, v. 1, p. 345–348, 2000.

LOURENÇÃO, A. L. F.; FERNANDES, M. G. Avaliação do Milho Bt Cry1Ab e Cry1F no controle de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) em condições de campo. **Científica, Jaboticabal**, v. 41, n. 2, p. 164–188, 2013.

LUCK, D. *et al.* Flagellar mutants of *Chlamydomonas*: studies of radial spoke-defective strains by dikaryon and revertant analysis. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 74, n. 8, p. 3456–60, ago. 1977.

LUSTOSA, P. R. B.; PONTE, V. M. R.; DOMINAS, W. R. Simulação. In: CORRAR, L. J.; THEÒPHILO, C. R. (Orgs.). *Pesquisa Operacional para decisão em contabilidade e administração*. 2008.

LUTTRELL, R. G.; WAN, L.; KNIGHTEN, K. Variation in Susceptibility of Noctuid (Lepidoptera) Larvae Attacking Cotton and Soybean to Purified Endotoxin Proteins and Commercial Formulations of *Bacillus thuringiensis*. **Journal of Economic Entomology**, v. 92, n. 1, p. 21–32, 1 fev. 1999.

MAIA, A. DE H. N. **Modelagem da evolução da resistência de pragas a toxinas Bt expressas em culturas transgênicas: quantificação de risco utilizando análise de incertezas**. Piracicaba: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 19 nov. 2003.

MATHENGE, E. M. *et al.* Effect of Permethrin-Impregnated Nets on Exiting Behavior, Blood Feeding Success, and Time of Feeding of Malaria Mosquitoes (Diptera: Culicidae) in Western Kenya. **Journal of Medical Entomology**, v. 38, n. 4, p. 531–536, 1 jul. 2001.

MATSUNAGA, M. *et al.* Metodologia de custo de produção utilizado pelo IEA. **Agricultura em São Paulo**, v. 23, n. 1, p. 123–139, 1976.

MAYA, F. L. A. **Produtividade e viabilidade econômica da recria e engorda de bovinos em pastagens adubadas intensivamente com e sem o uso da irrigação**. Piracicaba: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 4 jul. 2003.

MBOGO, C. N. M. *et al.* The impact of permethrin-impregnated bednets on malaria vectors of the Kenyan coast. **Medical and Veterinary Entomology**, v. 10, n. 3, p. 251–259, 1 jul. 1996.

MCGAUGHEY, W. H. Insect resistance to the biological insecticide *Bacillus thuringiensis*. **Science**, v. 229, p. 193–196, 12 jul. 1985.

MCGAUGHEY, W. H.; WHALON, M. E. Managing Insect Resistance to *Bacillus thuringiensis* Toxins. **Science (New York, N.Y.)**, v. 258, n. 5087, p. 1451–5, 27 nov. 1992.

MCGAUGHEY, W.; THEN, M. W.-S.-N. Y.; 1992, UNDEFINED. Managing insect resistance to *Bacillus thuringiensis* toxins. **search.proquest.com**, [s.d.].

MENEGATTI, A. L. A.; BARROS, A. L. M. DE. Análise comparativa dos custos de produção entre soja transgênica e convencional: um estudo de caso para o Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 45, n. 1, p. 163–183, mar. 2007.

MIGUEL, F. B. *et al.* RENTABILIDADE E RISCO DA PRODUÇÃO DE MILHO SAFRINHA GENETICAMENTE MODIFICADO E CONVENCIONAL NA REGIÃO DE GUAÍRA/SP. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 29, n. 1, p. 64, 2 mar. 2014.

MIRANOWSKI, J. *et al.* Economic Issues in Public and Private Approaches to Preserving Pest Susceptibility. 1 jan. 1986.

MONQUEIRO, P. A.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; DIAS, C. T. S. Resistência de plantas daninhas aos herbicidas inibidores da ALS na cultura da soja (*Glycine max*). **Planta Daninha**, v. 18, n. 3, p. 419–425, 2000.

MONSANTO. **Programa Plante Refúgio**. Disponível em: <<http://vtpro3.tecnologiasvtpro.com.br/Refugio.aspx>>. Acesso em: 5 jan. 2018.

MOORE, J. H. .; WEATHERFORD, L. R. **Decision modeling with Microsoft Excel**. 6. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

MUTERO, A. *et al.* Resistance-associated point mutations in insecticide- insensitive

acetylcholinesterase. **Genetics**, v. 91, p. 5922–5926, 1994.

NILL, K. **Correcting the Mithsa: Presenting the Truth about why U.S Farmers have Adopted Biotechnology**. American Soybean Association. St Louis, MO., 2003.

OLIVEIRA, A. L. R. DE; SILVEIRA, J. M. F. J. DA. **Implicações dos sistemas de segregação do milho na logística de transporte brasileira: aplicação de um problema de complementariedade mista** Anais do XVII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha. **Anais...**São Paulo: Editora Edgard Blücher, ago. 2014

OLIVEIRA, J. A. N. **Engenharia Econômica: uma abordagem às decisões de investimento**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

OLIVEIRA, M. R. G. DE N.; MEDEIROS, L. B. DE. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO E VALUATION: UMA ABORDAGEM ESTOCÁSTICA. **REGE Revista de Gestão**, v. 19, n. 3, 2012.

OMOTO, C. *et al.* Management of Citrus Rust Mite (Acari: Eriophyidae) Resistance to Dicotyl in Florida Citrus. **Journal of Economic Entomology**, v. 88, n. 5, p. 1120–1128, 1 out. 1995.

OMOTO, C. Manejo da Resistência de Insetos-Praga em Milho Transgênico. **Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**. Piracicaba., 2012.

OMOTO, C. *et al.* Field-evolved resistance to Cry1Ab maize by *Spodoptera frugiperda* in Brazil. **Pest Management Science**, v. 72, n. 9, p. 1727–1736, set. 2016.

ONSTAD, D. W.; GUSE, C. A. Economic Analysis of Transgenic Maize and Nontransgenic Refuges for Managing European Corn Borer (Lepidoptera: Pyralidae). **Journal of Economic Entomology**, v. 92, n. 6, p. 1256–1265, 1 dez. 1999.

ORLANDO, J. *et al.* AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE RENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DE MILHO VERDE PARA PROCESSAMENTO DE PAMONHA NO MUNICÍPIO DE MORRINHOS -GO. 2015.

OSAKI, M. *et al.* Avaliação de risco do sistema de produção com dupla safra em Cascavél, PR. **Agropecuária, meio ambiente e desenvolvimento: anais...**, 2015.

OSAKI, M.; ALVES, L. R. A.; BARROS, G. S. DE C. Estrutura dos custos de produção do milho no Brasil comparada à de outros países. **Visão Agrícola**, v. 13, n. 9, p. 154–158, 2015.

PALUMBI, S. R. *et al.* Humans as the world’s greatest evolutionary force. **Science (New York, N.Y.)**, v. 293, n. 5536, p. 1786–90, 7 set. 2001.

PAPA, G. *et al.* **Manejo de resistência de pragas a agrotóxicos** **Relação produtiva entre agricultura e apicultura**. Belo Horizonte: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1004874/1/Botton2014ManejoResistenciaPragasAgrotoxicos.pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2017.

PEARCE, D. W.; ATKINSON, G.; MOURATO, S. **Cost-benefit analysis and the environment: recent developments**. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2006.

PEREIRA DUARTE, A. Milho safrinha se consagra e caracteriza um sistema peculiar de produção. **Visão agrícola**, n. 13, 2015.

PICANÇO, M. C. **MANEJO INTEGRADO DE PRAGAS**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2010.

PIMENTEL, D. *et al.* Environmental and Social Costs of Pesticides: A Preliminary Assessment. **Oikos**, v. 34, n. 2, p. 126, 1980.

_____. 'Environmental and Economic Costs of the Application of Pesticides Primarily in the United States'. **Environment, Development and Sustainability**, v. 7, n. 2, p. 229–252, jun. 2005.

PIMENTEL, D.; BURGESS, M. Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. **Integrated Pest Management**, v. 3, p. 47–71, 2014.

RENSBURG, J. B. J. VAN. First report of field resistance by the stem borer, *Busseola fusca* (Fuller) to Bt-transgenic maize. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 24, n. 3, p. 147–151, jan. 2007.

ROCHA, A. *et al.* Resistência de Híbridos de milho convencionais e isogênicos transgênicos a *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). 2014.

ROUSH, R. T.; DALY, J. C. The Role of Population Genetics in Resistance Research and Management. *In*: **Pesticide Resistance in Arthropods**. Boston, MA: Springer US, 1990. p. 97–152.

ROUSH, R. T.; MCKENZIE, J. A. Ecological Genetics of Insecticide and Acaricide Resistance. **Annual Review of Entomology**, v. 32, n. 1, p. 361–380, jan. 1987.

SANTOS-AMAYA, O. F. *et al.* Resistance to dual-gene Bt maize in *Spodoptera frugiperda*: selection, inheritance and cross-resistance to other transgenic events. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 18243, 17 nov. 2016.

SAWICKI, R. M. Definition, detection and documentation of insecticide resistance. **Combating resistance to xenobiotics : biological and chemical approaches / edited by M.G. Ford ... [et al.]**, 1987.

SCHLECHT, S. M.; WILSON, W. W.; DAHL, B. L. Logistical Costs and Strategies for Wheat Segregation. **Agribusiness & Applied Economics Report** , n. 551, p. 41, 2004.

SCHÜTTE, G. **VARIETIES RESISTANT AGAINST INVERTEBRATE PESTS**. Disponível em: <https://azslide.com/varieties-resistant-against-invertebrate-pests_59eb0ec41723dd59f8291094.html>. Acesso em: 5 jan. 2018.

SENA, J. A. D.; HERNANDEZ-RODRIGUEZ, C. S.; FERRE, 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, 1 abr. 2009.

SILVA, B. E. C.; SILVA, M. R. J. VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DA CULTURA DO MILHO NO MUNICÍPIO DE SANTA TERESA-ES. **Revista Univap**, v. 23, n. 43, p. 17, 18 dez. 2017.

SIMS, S. R.; STONE, T. B. Genetic basis of tobacco budworm resistance to an engineered *Pseudomonas fluorescens* expressing the δ -endotoxin of *Bacillus thuringiensis* kurstaki. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 57, n. 2, p. 206–210, 1 mar. 1991.

SPARKS, A. N. A Review of the Biology of the Fall Armyworm. **The Florida Entomologist**, v. 62, n. 2, p. 82, jun. 1979.

SPARKS, T. C. *et al.* The role of behavior in insecticide resistance. **Pesticide Science**, v. 26, n. 4, p. 383–399, 1 jan. 1989.

STAETZ, C. A. International Code of Conduct on the Distribution and Use of Pesticides Guidelines on Prevention and Management of Pesticide Resistance. **FAO**, 2012.

STONE, B. F.; BROWN, A. W. Mechanisms of resistance to fenthion in *Culex pipiens fatigans* Wied. **Bulletin of the World Health Organization**, v. 40, n. 3, p. 401–8, 1969.

STORER, N. P. *et al.* Spatial processes in the evolution of resistance in *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) to Bt transgenic corn and cotton in a mixed agroecosystem: a biology-rich stochastic simulation model. **Journal of economic entomology**, v. 96, n. 1, p. 156–72, fev. 2003.

STORER, N. P. *et al.* Discovery and Characterization of Field Resistance to Bt Maize: *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Puerto Rico. **Journal of Economic**

Entomology, v. 103, n. 4, p. 1031–1038, 1 ago. 2010.

TABASHNIK, B. E. Evolution to resistance to *Bacillus thuringiensis*. **Annual Review of Entomology**, v. 39, n. 1, p. 47–79, 28 jan. 1994.

TABASHNIK, B. E. *et al.* Inheritance of Resistance to Bt Toxin Cry1Ac in a Field-Derived Strain of Pink Bollworm (Lepidoptera: Gelechiidae). **Journal of Economic Entomology**, v. 95, n. 5, p. 1018–1026, 1 out. 2002.

TABASHNIK, B. E. *et al.* Insect resistance to Bt crops: evidence versus theory. **Nature Biotechnology**, v. 26, n. 2, p. 199–202, 1 fev. 2008.

_____. Delaying insect resistance to transgenic crops. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 105, n. 49, p. 19029–30, 9 dez. 2008.

TABASHNIK, B. E.; CROFT, B. A. Managing Pesticide Resistance in Crop-Arthropod Complexes: Interactions Between Biological and Operational Factors 1. **Environmental Entomology**, v. 11, n. 6, p. 1137–1144, 1 dez. 1982.

TABASHNIK, B. E.; GOULD, F.; CARRIERE, Y. Delaying evolution of insect resistance to transgenic crops by decreasing dominance and heritability. **Journal of Evolutionary Biology**, v. 17, n. 4, p. 904–912, jul. 2004.

TABASHNIK, B. E.; RENSBURG, J. B. J. VAN; CARRIÈRE, Y. Field-evolved insect resistance to Bt crops: definition, theory, and data. **Journal of economic entomology**, v. 102, n. 6, p. 2011–2025, 2009.

- TSUNECHIRO, A.; AZARIAS MARTINS, V.; MIURA, M. **Fontes de crescimento da produção de milho segunda safra nos principais estados produtores, Brasil, 1993-2012.** (EMBRAPA, Ed.)XII Seminário Nacional Milho Segunda safra: Estabilidade e Produtividade. **Anais...**Dourados-MS: 2013Disponível em: <<http://www.cpao.embrapa.br/cds/milhosafrinha2013/PDF/72.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018
- VÉLEZ, A. M. *et al.* Inheritance of Cry1F resistance, cross-resistance and frequency of resistant alleles in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). **Bulletin of Entomological Research**, v. 103, n. 06, p. 700–713, 14 dez. 2013.
- VERAS, L. L. **Matemática financeira: uso de calculadoras financeiras, aplicações ao mercado financeiro, introdução à engenharia econômica, 300 exercícios resolvidos e propostos com respostas.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2001.
- VERGARA, W. R. H. *et al.* Economic and financial feasibility analysis for the acquisition of a storage soybeans and corn facility. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 12, n. 1, p. 41–62, 1 mar. 2017.
- VILARINHO, E. C. [UNESP]. Marcação de *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae) e dispersão de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Aleph**, p. viii, 59 f. : il., 13 dez. 2007.
- WAQUIL, J. M. *et al.* Controle da lagarta-do-cartucho em milho com inseticidas químicos e biológicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, DF, Brasília**, v. 17, n. 2, p. 163–166, 1982.
- YU, S. J.; NGUYEN, S. N.; ABO-ELGHAR, G. E. Biochemical characteristics of insecticide resistance in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith). **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 77, n. 1, p. 1–11, 1 set. 2003.
- ZANETTI, R. *et al.* Manejo integrado de pragas florestais. **Editora UFLA**, p. 119, 2005.
- ZEN, S. DE; PERES, F. C. **Painel agrícola como instrumento de comunicação.**CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 40., Passo Fundo, 2002. **Anais...**Brasília: SOBER, 2002

ANEXOS

ANEXO A. Tabelas descritivas das características da propriedade modal de Rio Verde – GO.

Tabela 14 - Tamanho da propriedade em hectares – discriminação da área agrícola, área de pastagem, reserva legal e preservação permanente, desde a safra de 2007/08 até 2015/16. Rio Verde – GO.

	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Reserva legal e APP	80,00	100,00	171,00	100,00	100,00	100,00	75,00
Área de pastagem	-	-	-	-	-	-	-
Área agrícola	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	300,00
Área arrendada	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	700,00
Área de reflorestamento	-	-	-	-	-	-	-
Área de cultivo	1.601,00	1.800,00	1.950,00	1.650,00	2.000,00	1.800,00	1.800,00

Fonte: Cepea (2018).

Nota: - Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

Tabela 15 - Produtividade em kg/ha – discriminado por cultura de cultivo, desde a safra de 2007/08 até 2015/16. Rio Verde – GO.

	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Soja <i>Bt</i>	50,00	55,00	60,00	57,00	45,00	40,00	56,00
Milho 2ª safra <i>Bt</i>	90,00	80,00	110,00	110,00	110	110,00	60,00
Soja Conv.	50,00	55,00	60,00	-	45,00	-	-
Soja GM 2ª safra	-	-	-	-	-	40,00	58,50
Milho 2ª safra Conv.	90,00	80,00	110,00	110,00	110,00	110,00	60,00
Milho verão Conv.	140,00	150,00	160,00	-	-	-	-
Milho verão <i>Bt</i>	140,00	150,00	160,00	-	110,00	-	-
Trigo	-	-	-	-	-	-	-
Feijão das águas	-	-	-	-	-	-	-
Feijão inverno	-	-	-	-	-	-	-
Feijão das secas	-	-	-	-	-	-	-
Sorgo	-	45,00	50,00	-	-	-	-
Algodão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Cepea (2018).

Nota: Conv.: Convencional.

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

Tabela 16 - Uso da área agrícola (própria e arrendada) em hectares, desde a safra de 2007/08 até 2015/16. Rio Verde – GO.

	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Soja <i>Bt</i>	270,00	765,00	855,00	1000,00	900,00	700,00	700,00
Milho 2ª safra <i>Bt</i>	300,00	260,00	630,00	520,00	600,00	560,00	560,00
Soja Conv,	630,00	135,00	95,00	-	100,00	-	-
Soja GM 2ª safra	-	-	-	-	-	300,00	300,00
Milho 2ª safra Conv.	300,00	260,00	270,00	130,00	400,00	240,00	240,00
Milho verão Conv.	70,00	30,00	10,00				
Milho verão <i>Bt</i>	30,00	70,00	40,00				
Trigo	-	-	-	-	-	-	-
Feijão das águas	-	-	-	-	-	-	-
Feijão inverno	-	-	-	-	-	-	-
Feijão das secas	-	-	-	-	-	-	-
Sorgo	-	280,00	50,00	-	-	-	-
Algodão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Cepea (2018).

Nota: - Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

Tabela 17 - Valor de venda dos produtos em reais correntes, desde a safra de 2007/08 até 2015/16. Rio Verde – GO.

	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Soja <i>Bt</i>	47,37	50,89	59,64	61,42	62,38	61,36	62,69
Milho 2ª safra <i>Bt</i>	18,47	27,29	23,15	21,39	-	20,82	25,00
Soja Conv.	47,37	50,89	59,64	-	66,36	-	-
Soja GM 2ª safra	-	-	-	-	-	61,36	62,69
Milho 2ª safra Conv.	18,47	27,29	23,15	21,39	19,90	20,82	25,00
Milho verão Conv.	21,64	25,93	25,95	-	-	-	-
Milho verão <i>Bt</i>	21,64	25,93	25,95	-	19,90	-	-
Trigo	-	-	-	-	-	-	-
Feijão das águas	-	-	-	-	-	-	-
Feijão inverno	-	-	-	-	-	-	-
Feijão das secas	-	-	-	-	-	-	-
Sorgo	-	-	-	-	-	-	-
Algodão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Cepea (2018).

Nota: Conv.: Convencional.

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

Tabela 18 - Valores investidos em máquinas, implementos, benfeitorias e terra, em reais correntes, desde a safra de 2007/08 até 2015/16. Rio Verde – GO.

	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Máquinas	1.875.000	2.308.000	2.574.000	2.594.000	3.402.000	3.199.500	2.664.000
Implementos	522.000	680.000	796.000	706.000	878.500	910.100	964.100
Benfeitorias	374.500	364.500	364.500	587.000	1.244.000	1.001.000	976.000
Terra	1.080.000	7.231.405	11.806.375	17.561.983	11.332.645	11.389.463	7.771.178

Fonte: Cepea (2018).

(continua)

[illegible]

Tabela 19 - Custos reais operacionais e totais e a receita bruta da produção de milho convencional e OGM - região de Rio Verde (GO) para safras de 2009/10 até 2015/16.

(conclusão)

	2009/10		2010/11		2011/12		2012/13		2013/14		2014/15		2015/16	
	Conv.	Bt	Conv.	Bt	Conv.	Bt	Conv.	Bt	Conv.	Bt	Conv.	Bt	Conv.	Bt
Colheita	120,53	120,53	63,25	60,39	93,36	93,36	83,38	83,38	97,70	97,70	87,12	87,12	57,83	57,83
Operações terceirizadas (C)	139,10	139,10	108,62	108,62	193,66	193,66	197,16	197,16	227,35	227,35	194,34	194,34	120,40	120,40
Mão de obra (D)	160,67	143,42	163,57	160,82	183,08	183,08	173,14	173,14	101,75	98,56	61,56	62,31	50,92	52,50
Irrigação (E)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo geral (F)	356,33	356,33	283,18	283,18	256,78	256,78	0,00	0,00	105,49	105,49	66,01	66,01	58,08	58,08
Comercialização (G)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	108,00	108,00
Impostos (H)	38,23	38,23	50,21	50,21	58,56	58,56	4,71	4,71	50,35	50,35	53,26	53,26	35,89	35,89
Arrendamento	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Seguro (I)	18,30	18,30	17,63	17,63	17,54	17,54	19,04	19,04	20,11	20,11	20,69	20,69	16,54	16,54
Assistência técnica (J)	33,50	33,89	30,91	33,29	33,08	35,57	34,72	35,79	37,98	40,59	0,00	0,00	27,96	30,13
Juros de capital de giro (K)	227,41	12,51	148,59	158,27	152,03	161,99	121,38	125,11	119,66	127,46	153,51	158,57	149,62	160,02
Custo Operacional efetivo (CO)	2.348,86	2.153,68	2.053,38	2.182,80	2.146,22	2.281,79	1.915,92	1.974,20	2.232,52	2.373,43	2.068,06	2.133,71	1.794,29	1.915,37
Total de depreciação	144,68	142,26	106,14	105,48	139,01	139,01	114,05	114,05	149,26	148,21	126,31	127,38	108,68	108,68
Custo Operacional total (COT)	2.506,47	2.308,88	2.174,31	2.303,07	2.298,33	2.433,90	2.043,72	2.102,00	2.381,79	2.521,63	2.194,37	2.261,09	1.902,97	2.024,05
Juros sobre investimento	88,56	88,56	83,66	83,66	82,60	82,60	92,33	92,33	104,20	104,20	139,91	139,91	113,07	113,07
Custo oportunidade da terra	137,66	137,66	0,00	0,00	328,56	328,56	224,07	224,07	381,30	381,30	340,92	340,92	221,37	221,37
Custo Total (CT)	2.732,70	2.535,11	2.257,97	2.386,73	2.709,50	2.845,07	2.360,13	2.418,41	2.867,29	3.007,14	2.675,20	2.741,92	2.237,41	2.358,49
Preço médio ponderado na safra	18,47	18,47	27,29	27,29	23,15	23,15	21,39	21,39	19,90	19,90	20,82	20,82	25,00	25,00
Produtividade	90,00	90,00	80,00	80,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	60,00	60,00
Renda Bruta	1.662,26	1.662,26	2.183,26	2.183,26	2.546,22	2.546,22	2.352,76	2.352,76	2.189,31	2.189,31	2.289,83	2.289,83	1.500,00	1.500,00

Fonte: Cepea (2018)

ANEXO C. Percentis de risco do VPL e coeficiente B/C simulados para os cenários A, 1B, 2B e 3B, para 10 anos de estudo e para a produção de milho *Bt* e convencional, para 7 anos de estudo.

Tabela 20 - Percentil de risco do VPL da produção de milho *Bt*, sob condição de evolução da resistência de pragas, simuladas pelos cenários 1B, 2B e 3B na propriedade modal de Rio Verde (GO) para 10 anos de estudo.

	VPL cenário A	VPL cenário 1B	VPL cenário 2B	VPL cenário 3B	Preço	Produtividade
Mínimo	-7947,85	-8.861,00	-8.871,54	-9.027,34	18,49	60,14
Máximo	7680,32	7.118,51	7.107,97	6.952,17	27,28	109,92
Média	-393,75	-1.266,23	-1.276,77	-1.432,57	22,68	88,57
Desvio Padrão	2570,98	2.571,58	2.571,58	2.571,58	1,81	10,51
Variância	6609948	6613020	6613020	6613020	3,26	110,54
Assimetria	-0,007803418	-0,01694938	-0,01694938	-0,01694938	0,13	-0,38
Curtose	2,606596	2,603062	2,603062	2,603062	2,40	2,40
Erros	0	0	0	0	0,00	0,00
Moda	224,11	-648,84	-659,37	-8.15,17	22,30	95,73
5% Perc	-4695,26	-5.558,15	-5568,69	-5.724,49	19,77	69,45
10% Perc	-3834,08	-4.704,20	-4.714,74	-4.870,54	20,31	73,36
15% Perc	-3204,96	-4.072,64	-4.083,18	-4.238,98	20,72	76,36
20% Perc	-2666,48	-3.550,59	-3.561,13	-3.716,93	21,07	78,90
25% Perc	-2194,76	-3.083,61	-3.094,15	-3.249,95	21,37	81,13
30% Perc	-1794,44	-2.669,90	-2.680,43	-2.836,23	21,65	83,14
35% Perc	-1417,35	-2.277,47	-2.288,01	-2.443,81	21,90	85,00
40% Perc	-1044,35	-1.906,05	-1.916,59	-2.072,39	22,14	86,72
45% Perc	-692,59	-1.560,35	-1.570,89	-1.726,69	22,36	88,35
50% Perc	-348,84	-1.217,58	-1.228,12	-1.383,92	22,59	89,88
55% Perc	-11,83	-887,29	-897,83	-1.053,63	22,84	91,34
60% Perc	320,68	-549,19	-559,73	-715,53	23,09	92,73
65% Perc	659,47	-204,58	-215,12	-370,92	23,36	94,07
70% Perc	1025,78	155,95	145,42	-10,38	23,65	95,35
75% Perc	1414,09	553,53	542,99	387,20	23,97	96,63
80% Perc	1843,38	970,89	960,36	804,56	24,32	98,05
85% Perc	2329,19	1.482,50	1.471,96	1.316,16	24,72	99,65
90% Perc	2924,64	2.068,17	2.057,63	1.901,83	25,19	101,55
95% Perc	3821,55	2.932,38	2.921,84	2.766,04	25,80	104,02

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 21 - Percentil de risco do B/C da produção de milho *Bt*, sob condição de evolução da resistência de pragas, simuladas pelos cenários 1B, 2B e 3B na propriedade modal de Rio Verde (GO) para 10 anos de estudo.

	B/C cenário A	B/C cenário 1B	B/C cenário 2B	B/C cenário 3B	Preço	Produtividade
Mínimo	0,57	0,54	0,54	0,53	18,49	60,14
Máximo	1,42	1,37	1,37	1,36	27,28	109,92
Média	0,98	0,93	0,93	0,93	22,68	88,57
Desvio Padrão	0,14	0,13	0,13	0,13	1,81	10,51
Variância	0,01967008	0,0179312	0,01791154	0,01762457	3,26	110,54
Assimetria	- 0,007803418	-0,0169493	-0,0169493	-0,0169493	0,13	-0,38
Curtose	2,606596	2,603062	2,603062	2,603062	2,40	2,40
Erros	0	0	0	0	0,00	0,00
Moda	1,01	0,97	0,97	0,96	22,30	95,73
5% Perc	0,74	0,71	0,71	0,70	19,77	69,45
10% Perc	0,79	0,76	0,75	0,75	20,31	73,36
15% Perc	0,83	0,79	0,79	0,78	20,72	76,36
20% Perc	0,85	0,82	0,81	0,81	21,07	78,90
25% Perc	0,88	0,84	0,84	0,83	21,37	81,13
30% Perc	0,90	0,86	0,86	0,85	21,65	83,14
35% Perc	0,92	0,88	0,88	0,87	21,90	85,00
40% Perc	0,94	0,90	0,90	0,89	22,14	86,72
45% Perc	0,96	0,92	0,92	0,91	22,36	88,35
50% Perc	0,98	0,94	0,94	0,93	22,59	89,88
55% Perc	1,00	0,95	0,95	0,95	22,84	91,34
60% Perc	1,02	0,97	0,97	0,96	23,09	92,73
65% Perc	1,04	0,99	0,99	0,98	23,36	94,07
70% Perc	1,06	1,01	1,01	1,00	23,65	95,35
75% Perc	1,08	1,03	1,03	1,02	23,97	96,63
80% Perc	1,10	1,05	1,05	1,04	24,32	98,05
85% Perc	1,13	1,08	1,08	1,07	24,72	99,65
90% Perc	1,16	1,11	1,11	1,10	25,19	101,55
95% Perc	1,21	1,15	1,15	1,14	25,80	104,02

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 22 - Percentil de risco do VPL da produção de milho *Bt* e convencional, na propriedade modal de Rio Verde (GO) para 7 anos de estudo.

	VPL produção de milho <i>Bt</i>	VPL produção de milho convencional	Preço	Produtividade
Mínimo	-8.402,51	-8.228,32	18,49	60,08
Máximo	7.487,85	7.662,05	27,27	109,92
Média	-875,22	-701,03	22,68	88,57
Desvio Padrão	2.575,80	2.575,80	1,81	10,51
Variância	6634756	6634756	3,26	110,54
Assimetria	-0,006217978	-0,006217978	0,13	-0,38
Curtose	2,592013	2,592013	2,40	2,40
Erros	0	0	0,00	0,00
Moda	-406,79	-232,60	22,30	95,73
5% Perc	-5.179,05	-5.004,86	19,77	69,45
10% Perc	-4.313,55	-4.139,36	20,31	73,36
15% Perc	-3.691,98	-3.517,79	20,72	76,37
20% Perc	-3.169,31	-2.995,12	21,07	78,90
25% Perc	-2.698,78	-2.524,58	21,37	81,13
30% Perc	-2.281,10	-2.106,90	21,65	83,14
35% Perc	-1.895,34	-1.721,15	21,90	85,00
40% Perc	-1.539,28	-1.365,09	22,14	86,72
45% Perc	-1.186,15	-1.011,96	22,37	88,35
50% Perc	-842,29	-668,10	22,59	89,88
55% Perc	-507,03	-332,84	22,84	91,34
60% Perc	-166,31	7,88	23,09	92,73
65% Perc	190,05	364,24	23,36	94,07
70% Perc	552,64	726,83	23,65	95,35
75% Perc	946,19	1.120,38	23,97	96,63
80% Perc	1382,22	1.556,41	24,32	98,05
85% Perc	1.857,19	2.031,38	24,72	99,65
90% Perc	2.478,92	2.653,11	25,19	101,55
95% Perc	3.348,37	3.522,56	25,80	104,02

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 23 - Percentil de risco do B/C da produção de milho *Bt* e convencional, na propriedade modal de Rio Verde (GO) para 7 anos de estudo.

	B/C produção de milho <i>Bt</i>	B/C produção de milho convencional	Preço	Produtividade
Mínimo	0,55	0,56	18,49	60,08
Máximo	1,40	1,41	27,27	109,92
Média	0,95	0,96	22,68	88,57
Desvio Padrão	0,14	0,14	1,81	10,51
Variância	0,01874493	0,01909692	3,26	110,54
Assimetria	-0,006217978	-0,006217978	0,13	-0,38
Curtose	2,592013	2,592013	2,40	2,40
Erros	0	0	0,00	0,00
Moda	0,98	0,99	22,30	95,73
5% Perc	0,72	0,73	19,77	69,45
10% Perc	0,77	0,78	20,31	73,36
15% Perc	0,80	0,81	20,72	76,37
20% Perc	0,83	0,84	21,07	78,90
25% Perc	0,86	0,86	21,37	81,13
30% Perc	0,88	0,89	21,65	83,14
35% Perc	0,90	0,91	21,90	85,00
40% Perc	0,92	0,93	22,14	86,72
45% Perc	0,94	0,95	22,37	88,35
50% Perc	0,96	0,96	22,59	89,88
55% Perc	0,97	0,98	22,84	91,34
60% Perc	0,99	1,00	23,09	92,73
65% Perc	1,01	1,02	23,36	94,07
70% Perc	1,03	1,04	23,65	95,35
75% Perc	1,05	1,06	23,97	96,63
80% Perc	1,07	1,08	24,32	98,05
85% Perc	1,10	1,11	24,72	99,65
90% Perc	1,13	1,14	25,19	101,55
95% Perc	1,18	1,19	25,80	104,02

Fonte: Elaboração própria.