

**ANÁLISE DIGITAL DA HERBIVORIA DE *Spodoptera
frugiperda* EM SOJA *Bt* VIA ÍNDICE ESPECTRAL VISÍVEL**

Murillo Magalhães Rebello
Engenheiro Agrônomo

MURILLO MAGALHÃES REBELLO

**ANÁLISE DIGITAL DA HERBIVORIA DE *Spodoptera frugiperda*
EM SOJA *Bt* VIA ÍNDICE ESPECTRAL VISÍVEL**

Orientador: Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva

Dissertação apresentada ao Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Proteção de Plantas para obtenção do título de MESTRE.

URUTAÍ - GO
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi

R291	Rebello, Murillo ANÁLISE DIGITAL DA HERBIVORIA DE Spodoptera frugiperda EM SOJA Bt VIA ÍNDICE ESPECTRAL VISÍVEL / Murillo Rebello. Uberlândia 2025. 122f. il. Orientador: Prof. Me. Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva. Monografia (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de 0133054 - Mestrado Profissional em Proteção de Plantas - Urutai (Campus Urutai). I. Título.
------	---

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

☐ Tese (doutorado) Dissertação

☒ (mestrado) Monografia

☐ (especialização) TCC

☐ (graduação)

☐ Artigo científico

☐ Capítulo de livro Livro

☐ Trabalho apresentado em evento

☐

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Murillo Magalhães Rebello

Matrícula:

2023101330540018

Título do trabalho:

ANÁLISE DIGITAL DA HERBIVORIA DE Spodoptera frugiperda EM SOJA Bt VIA ÍNDICE ESPECTRAL VISÍVEL

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 15 /07 /2025

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não O

documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

• Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;

• Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;

• Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.



Documento assinado digitalmente
MURILLO MAGALHAES REBELLO
Data: 15/07/2025 10:36:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

uberlândia

Local

15 /07 /2025

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



Documento assinado digitalmente
ANDERSON RODRIGO DA SILVA
Data: 16/09/2025 20:41:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 58/2025 - CREPG-UR/DPGPI-UR/CMPURT/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos trinta dias do mês de maio de dois mil e vinte e cinco, às treze horas e trinta minutos, reuniram-se por videoconferência os componentes da banca examinadora, para procederem à avaliação da defesa de dissertação em nível de mestrado, de autoria de *Murillo Magalhães Rebello*, discente do Programa de Pós-Graduação em Proteção de Plantas do Instituto Federal Goiano - Campus Urutaí, com trabalho intitulado "ANÁLISE DIGITAL DA HERBIVORIA DE *Spodoptera frugiperda* EM SOJA Bt VIA ÍNDICE ESPECTRAL VISÍVEL". A sessão foi aberta pelo presidente da banca examinadora, Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da dissertação para, em até 30 minutos, proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se à avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Proteção de Plantas, o candidato foi considerado APROVADO, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de MESTRE EM PROTEÇÃO DE PLANTAS, na área de concentração em Fitossanidade, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí. A conclusão do curso dar-se-á mediante ao depósito da dissertação definitiva no Repositório Institucional do IF Goiano, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade se não cumprida essa condição, em até 60 (sessenta) dias da sua ocorrência. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da banca examinadora.

Membros da Banca Examinadora:

Nome	Instituição	Situação no Programa
Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva	IF Goiano	Presidente
Dr. André Cirilo de Sousa Almeida	IF Goiano	Membro Interno
Dr ^a . Lilian Faria de Melo	Syngenta	Membra Externa

Documento assinado eletronicamente por:

- **Anderson Rodrigo da Silva**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 30/05/2025 15:19:17.
- **Andre Cirilo de Sousa Almeida**, **COORDENADOR(A) DE CURSOS - FUC0001 - CCMPP-URT**, em 30/05/2025 16:10:08.
- **Lilian Faria de Melo**, **Lilian Faria de Melo - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Urutai (10651417000259)**, em 06/06/2025 16:24:44.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/05/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 712381

Código de Autenticação: b6477bbabf



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Urutai
Rodovia Geraldo Silva Nascimento, Km 2.5, SN, Zona Rural, URUTAI / GO, CEP 75790-000
(64) 3465-1900

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder sabedoria, força e perseverança ao longo desta jornada. Sem Sua presença e bênçãos em minha vida, nada disso seria possível. Sou eternamente grato por Sua orientação e amparo em cada passo do caminho.

À minha esposa, Lauany Oliveira Santos, expresso minha mais profunda gratidão pelo apoio incondicional durante todo o percurso deste mestrado. Mesmo com a chegada da nossa bebê, ela esteve sempre ao meu lado, oferecendo força, paciência e compreensão. Sua dedicação e amor foram fundamentais para que eu seguisse em frente, especialmente nos momentos de cansaço e desafio. Não há palavras que expressem o quanto sou grato por tudo o que fez por mim e por nossa família.

Aos meus pais, minha eterna gratidão pelo suporte incansável e pelo incentivo ao longo de toda minha trajetória acadêmica. Desde sempre, me motivaram a estudar, buscar conhecimento e jamais desistir dos meus sonhos. Suas palavras de encorajamento, preocupação e dedicação foram essenciais para que eu tivesse forças para superar os obstáculos e alcançar esta conquista.

Agradeço também aos meus gestores da Syngenta, cujo apoio e compreensão me permitiram conciliar trabalho e estudos. A oportunidade de dedicar tempo à pesquisa foi essencial para que este projeto fosse concluído com qualidade. Sou imensamente grato pelo suporte recebido ao longo desse período.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Proteção de Plantas, minha sincera gratidão pelo compartilhamento de conhecimentos e pela orientação ao longo desta trajetória. Cada ensinamento contribuiu significativamente para meu crescimento acadêmico e profissional.

Em especial, registro meu profundo agradecimento ao meu orientador, Professor Anderson Rodrigo da Silva. Sua paciência, dedicação e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por acreditar em meu potencial e por todo o suporte acadêmico e profissional oferecido ao longo dessa jornada.

A todos vocês, minha gratidão eterna. Este trabalho é, de muitas formas, um reflexo do apoio e das oportunidades que sempre recebi.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
INTRODUÇÃO	1
OBJETIVO.....	5
MATERIAL E MÉTODOS.....	6
RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS.....	15
APÊNDICE 1	20

RESUMO

A soja, cultura de grande relevância econômica e multisetorial - alimentação humana e animal, cosméticos, fármacos e biocombustíveis - tem na tecnologia *Bt* um dos principais avanços para o controle de pragas, embora a resistência de *Spodoptera frugiperda* à proteína Cry1Ac exija estratégias complementares. Este trabalho, conduzido entre outubro e dezembro em Uberlândia (MG) com uma cultivar transgênica RR+*Bt*, avaliou digitalmente o consumo foliar por lagartas após aplicação de seis tratamentos (controle químico Engeo® [tiametoxam + lambda-cialotrina], *B. thuringiensis* cepa HD-1 e CCT 1306 [B1], *B. thuringiensis* var. *aizawai* cepa GC-91 [B2], *B. thuringiensis* var. *kurstaki* cepa HD-1 [B3], mix de cepas CCTB22/CCTB23/CCTB25 [B4] e testemunha sem inseticida), cada um com 20 repetições. Folíolos foram tratados, colocados em bandejas com ágar-água contendo antimicrobiano e expostos a lagartas; imagens RGB das lâminas foliares foram capturadas e processadas em R® usando o índice espectral VARI. O VARI distinguiu com precisão tecido saudável de áreas danificadas, mostrou robustez a variações de iluminação e permitiu análise objetiva contínua. Identificou-se interação significativa ($p < 0,001$) entre inseticida e tempo, com diferenças acentuadas a partir do segundo dia, justificando avaliações mínimas de dois dias. O controle químico limitou o consumo médio a 2,6% da área foliar, Dipel® (B2) e Agree® (B3) apresentaram eficácia intermediária (~52% de área consumida) e *Bt*Control® (B1) e Bioturim® (B4) foram menos eficientes (~78%). A testemunha teve praticamente 100% de consumo, evidenciando o dano potencial sem controle. Esses achados confirmam a eficácia imediata do químico, apontam para a necessidade de otimizar formulações biológicas e reforçam a aplicabilidade do VARI como ferramenta acessível para monitoramento de danos em soja *Bt*.

Palavras-chave: Controle biológico; Entomopatogênico; Herbivoria; *Glycine max*

ABSTRACT

Soybean is one of the most important crops worldwide, with extensive use in human and animal nutrition, as well as applications in cosmetics, pharmaceuticals, and biofuels. In Brazil, soybean plays a crucial role in the economy, with the adoption of advanced agricultural technologies—such as genetically modified cultivars—being one of the main drivers of increased production. Bt soybean, which expresses insecticidal proteins derived from the bacterium *Bacillus thuringiensis* (*Bt*), provides protection against various pests, particularly those from the orders Coleoptera, Diptera, Hymenoptera, and Lepidoptera. However, the increasing resistance of pests such as *Spodoptera frugiperda* to the Cry1Ac protein found in some *Bt* cultivars compromises the effectiveness of this technology, making it necessary to develop complementary strategies to maintain efficient pest control. The objective of this study was to evaluate the application of digital imaging to quantify the efficacy of bioinsecticides in controlling *Spodoptera frugiperda* on Bt soybean by digitally analyzing the leaf area consumed by the caterpillar. The experiment was conducted between October and December in Uberlândia, Minas Gerais, using a transgenic soybean cultivar (RR and Bt technology). Six treatments were tested: chemical control (thiamethoxam and lambda-cyhalothrin), *B. thuringiensis* strains HD-1 and CCT 1306 (B1), *B. thuringiensis* var. *aizawai* strain GC 91 (B2), *B. thuringiensis* var. *kurstaki* strain HD-1 (B3), *B. thuringiensis* strains CCTB22, CCTB23, and CCTB25 (B4), and a control (no insecticides), with 20 replications per treatment. The leaves were treated and placed in trays, where they were exposed to larvae for assessment of foliar consumption. RGB images of the leaf blade were captured and used to determine the consumed area using R® software. The analysis revealed that the chemical control resulted in an average consumption of 2.6% of the soybean leaf area. The bioinsecticides showed variable efficacy, with treatments B2 and B3 displaying intermediate performance (approximately 52.2% of the soybean leaf area), whereas B1 and B4 were less effective (approximately 78.1% of the soybean leaf area). These results highlight the need to improve the formulation of bioinsecticides and to integrate different control strategies, such as the combined use of bioinsecticides and chemical insecticides, for more effective and sustainable integrated pest management.

Key words: Biological control; Entomopathogenic; Herbivory; *Glycine max*

INTRODUÇÃO

A expansão e expressão da sojicultura brasileira deve-se, em parte, à adoção de tecnologias que visam aumentar a produtividade e a sustentabilidade das lavouras. Essas tecnologias possibilitaram o cultivo da soja em 47,5 milhões de hectares e uma produção de 166 milhões de toneladas (CONAB, 2025). Entre as principais tecnologias, destaca-se a introdução de cultivares de soja geneticamente modificadas, como a soja *Bt*, que incorpora genes da bactéria *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) (KUMAR et al., 2021).

A tecnologia *Bt* confere à planta a capacidade de produzir proteínas inseticidas, conhecidas como proteínas *Cry*, que são tóxicas para determinados insetos das ordens Coleoptera, Diptera, Hymenoptera, e Lepidoptera, incluindo as espécies do gênero *Spodoptera* (MACHADO et al., 2020; GODOY et al., 2022; BARCELLOS et al., 2023). O mecanismo de ação dessas proteínas envolve a ingestão pelos insetos, seguida de sua ativação no trato digestivo alcalino das lagartas, resultando na formação de poros nas células intestinais e, consequentemente, na morte do inseto (SANTOS et al., 2015; HECKEL et al., 2020; KUMAR et al., 2021).

A adoção da soja *Bt* tem proporcionado benefícios significativos, como a redução na aplicação de inseticidas químicos, a diminuição dos danos causados por pragas e economias nos custos de produção, contribuindo para uma agricultura mais rentável e ambientalmente sustentável (GASSMANN & REISIG, 2023). No entanto, a eficácia da tecnologia *Bt* na transgenia pode ser comprometida pelo desenvolvimento de resistência em populações de insetos praga (CARRIÈRE et al., 2020; JURAT-FUENTES et al., 2021; TYAGI et al., 2020; GASSMANN & REISIG, 2023; TABASHNIK et al., 2023).

Uma das principais pragas da cultura da soja, *Spodoptera frugiperda* (comumente conhecida como “lagarta do cartucho” na cultura do milho), tem desenvolvido resistência à proteína *Cry1Ac*, expressa em algumas cultivares de soja *Bt* (MACHADO et al., 2020; HORIKOSHI et al., 2021). Esse fenômeno ocorre devido à pressão seletiva exercida pelo uso contínuo de plantas *Bt*, onde indivíduos resistentes sobrevivem e se reproduzem, transmitindo essa característica às gerações subsequentes (GASSMANN & REISIG, 2023; TABASHNIK et al., 2023). A resistência de *S. frugiperda* à proteína *Cry1Ac* ressalta a necessidade de estratégias complementares de manejo para manter a eficácia do controle de pragas (TYAGI et al., 2020; GODOY et al., 2022).

Nesse contexto, o uso de produtos biológicos à base de *B. thuringiensis* surge como uma alternativa promissora no manejo integrado de pragas. Esses bioinseticidas contêm esporos e cristais proteicos de *Bt* que, ao serem aplicados na cultura, são ingeridos pelas lagartas, causando sua morte por septicemia (SANTOS et al., 2015; JURAT-FUENTES et al., 2021). Além de serem bastante específicos, esses produtos apresentam baixo impacto ambiental e são relativamente seguros para organismos não-alvo, incluindo seres humanos (GHIMIRE et al., 2023; SHELKE et al., 2023; NOACK et al., 2024).

A integração de cultivares *Bt* com aplicações de bioinseticidas à base de *B. thuringiensis* pode adiar o desenvolvimento de resistência em populações de pragas e aumentar a eficácia do controle (HECKEL et al., 2020; KUMAR et al., 2021). Essa abordagem integrada é fundamental para a sustentabilidade da cultura da soja e para a redução da dependência de inseticidas químicos convencionais.

A adoção de estratégias de manejo integrado de pragas (MIP) é, então, essencial para prolongar a eficácia das tecnologias *Bt* e preservar a saúde do ecossistema agrícola. O MIP envolve a combinação de diferentes táticas de controle, incluindo o uso de cultivares resistentes, aplicação de bioinseticidas, monitoramento constante das populações de pragas e práticas culturais adequadas que reforçam a importância de diversificar as estratégias de controle para mitigar os danos às plantas - principalmente a herbivoria e perda de área foliar - e o risco de desenvolvimento de resistência e assegurar a produtividade das lavouras.

Determinar com precisão a área foliar consumida por lagartas envolve desafios metodológicos devido à variabilidade na morfologia e na distribuição das folhas, além das interferências de iluminação e sombras que prejudicam a delimitação exata dos contornos foliares. A variabilidade espacial e temporal das infestações também complica a obtenção de dados representativos por meio de amostragens pontuais. Métodos tradicionais - baseados em observações visuais ou medições manuais - revelam-se subjetivos e propensos a erros sistemáticos, dificultando comparações entre tratamentos e períodos avaliativos.

Para reduzir a subjetividade, uma série de escalas diagramáticas foi proposta ao longo das décadas. Rowan et al. apresentaram categorias visuais de desfolha em soja, facilitando comparações entre cultivares e avaliações repetidas em diferentes locais (ROWAN et al., 1991). A prática de avaliação visual também pode ser melhorada calibrando-se o entomologista de campo para diferentes níveis de severidade antes da aplicação de inseticidas (SISSON & MUELLER, 2023). Além disso, economicistas de pragas têm baseado limiares de controle em

estimativas visuais de desfolha em estádios vegetativos e reprodutivos, reforçando a importância da padronização para decisões de manejo integrado (DEBNATH et al., 2024).

Desde as primeiras tentativas de quantificar visualmente o dano foliar, escalas diagramáticas e pontuações manuais têm sido amplamente utilizadas. Os primeiros índices de severidade de desfolha foram baseados em estimativas visuais do percentual de área foliar perdida, demonstrando a relação direta entre dano e perda de rendimento em diversas culturas (PAINTER, 1941). Van Duyn et al. (1971) classificaram genótipos de soja quanto à resistência ao besouro mexicano do feijoeiro (*Epilachna varivestis*), usando avaliações visuais de desfolha como indicador primário de resistência. Posteriormente, curvas de resposta de rendimento para insetos desfolhadores da soja foram sugeridas aplicando-se técnicas de desfolha simulada e avaliação visual em campo, o que permitiu calibrar limiares econômicos de controle (HAMMOND & PEDIGO, 1982).

Técnicas digitais de avaliação de imagens, especialmente com câmeras RGB, emergem como alternativas promissoras para mensurar mais precisamente o dano foliar (BARBEDO et al., 2016; NGUGI et al., 2021). Mesmo com o surgimento de ferramentas digitais, muitos estudos jovens ainda recorrem à avaliação visual para calibrar algoritmos. Machado et al. validaram o aplicativo BioLeaf comparando-o com avaliações manuais especialista-a-especialista em folhas de soja, mostrando alta correlação entre as estimativas visuais e os resultados computacionais (MACHADO et al., 2016). Oerke e Dehne (2004) demonstraram como perdas foliares estimadas visualmente podem representar até 40% da produção se não forem corretamente quantificadas e integradas a estratégias de manejo. Contudo, Liang et al. (2017) utilizaram estimativas visuais de desfolha como padrão para treinar modelos de classificação de imagens em soja, reforçando a dependência inicial das avaliações humanas antes da adoção plena de métodos automatizados.

Ademais, o uso de índices espectrais, como o VARI (visible atmospherically resistant index), permite quantificar com objetividade as variações na área foliar mesmo diante de condições ambientais variáveis (GITELSON et al., 2002; DIN et al., 2017). Além do VARI, diversos índices espectrais têm sido empregados para estimar a área foliar em culturas agrícolas. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é amplamente utilizado, estabelecendo relações empíricas robustas com o Índice de Área Foliar (LAI) em diversas culturas, embora apresente saturação em valores elevados de LAI (BAJOCCO et al., 2022; FURLANETTO et al., 2023). O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) foi desenvolvido

para minimizar a influência do brilho do solo em áreas com baixa cobertura vegetal, sendo eficaz na estimativa do LAI em diversos tipos de cobertura do solo (HUETE, 1988; MOKHTARI et al., 2018). Além disso, índices baseados na reflectância da borda vermelha, como o Índice de Vegetação da Borda Vermelha (REVI), têm demonstrado alta sensibilidade na estimativa do LAI em culturas como o arroz, especialmente em diferentes estágios de crescimento e sob variações nas taxas de nitrogênio (NAZERI et al., 2021). Esses índices oferecem alternativas valiosas para a quantificação precisa da área foliar, contribuindo para o monitoramento eficiente da saúde e produtividade das culturas.

Apesar dos desafios na calibração e padronização do processamento, tais métodos têm demonstrado eficácia na avaliação dos efeitos da herbivoria em culturas agrícolas (WEISS et al., 2020; KUMAR et al., 2024; ROSEN et al., 2024). Portanto, o presente estudo tem por hipótese que a avaliação digital de imagens de área foliar consumida pode ser utilizada para avaliar a eficácia de inseticidas biológicos no controle de *Spodoptera* spp. em soja *Bt*.

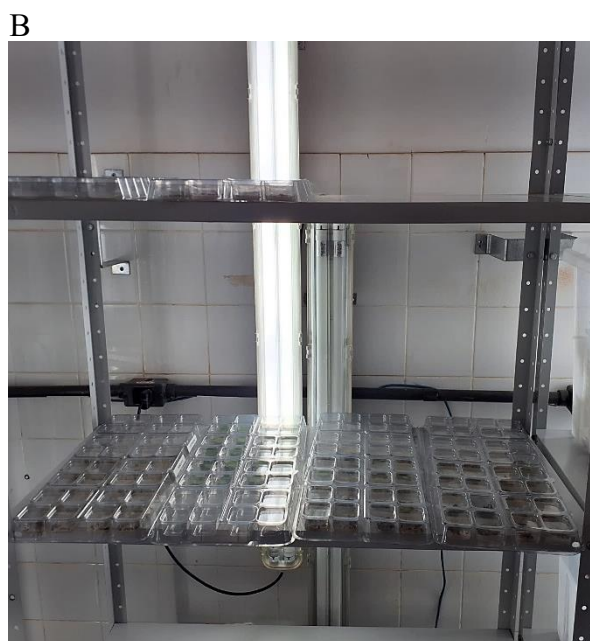
OBJETIVO

Avaliar o uso de imagens digitais para quantificar o efeito de bioinseticidas no controle de *Spodoptera frugiperda* em soja transgênica (*Bt*), analisando através de imagens digitais a área foliar consumida pelas lagartas.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no laboratório do departamento de *Crop* da Estação Experimental da Syngenta localizada em Uberlândia, MG (altitude 863 m, lat. 18°56'12" S e long. 48°10'28" O) no período de outubro a dezembro de 2024. Uma cultivar de soja (Syn 2282 IPRO) com tecnologia Intacta (transgenia *RR* e *Bt*) foi utilizada neste estudo. O cultivo da soja foi realizado em casa de vegetação (28-30 °C) em vasos (2,5 litros) preenchidos com substrato orgânico (Bioplant® Plus) mais fertilizante mineral (200 kg ha⁻¹ de NPK 4-14-8). Cada vaso foi semeado com 3 sementes de soja e irrigado regularmente para manter a capacidade de campo.

As folhas da soja foram coletadas em estágio de desenvolvimento V4 (quarto nó foliar e terceira folha trifoliolada completamente desenvolvida) (Figura 1A), e com o auxílio de um pulverizador manual (testado previamente em papel hidrossensível para garantir a uniformidade da aplicação) receberam as aplicações dos tratamentos antes de serem depositadas nas células (3 × 3 cm²) da bandeja transparente de avaliação. Um folíolo da folha de soja foi posicionado em cada célula da bandeja contendo 3 mL de ágar-água (2%) com antimicrobiano (2,74 g L⁻¹ de Nipagin) e devidamente identificadas. As placas foram tampadas e mantidas a 25 °C e fotoperíodo de 12/12 h (Figura 1B).



C

D



Figura 1. Plantas de soja entrando no estágio V4 (A); sala climatizada para manutenção das células plásticas contendo folíolo de soja e lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*) (B); lagartas-do-cartucho jovens utilizadas em substrato artificial para sua alimentação (C); células em bandeja plástica transparente com ágar-água (2% mais antimicrobiano) para avaliações de área foliar da soja consumida pela lagarta-do-cartucho (D).

As lagartas-do-cartucho utilizadas neste estudo foram fornecidas pelo laboratório de *Trait Assessment* (TA) sediado na estação de pesquisa da Syngenta (Figura 1C). Cada célula foi ocupada então por uma lagarta-do-cartucho que foi alimentada com uma dieta artificial específica, conforme indicado na Tabela 1, durante o seu estágio de crescimento larval. Antes de serem expostas às folhas, as lagartas foram submetidas a um período de jejum de 48 horas para garantir que todas estivessem em condições fisiológicas semelhantes. Esse método é comumente empregado para coordenar a alimentação e garantir a consistência nas respostas de consumo foliar entre as lagartas examinadas.

Tabela 1. Ingredientes para preparo de 1 dieta artificial (Adaptada de GREENE et al., 1976).

Ingrediente	Quantidade*
Feijão branco (moído)	150 g
Levedo de cerveja	75 g
Gérmen de trigo	120 g
Caseína	60 g
Proteína ou Farelo de Soja**	60 g
Ágar-Ágar	40 g
Ácido ascórbico	10 g

Ácido sórbico	5 g
Nipagin	8 g
Tetraciclina	0,4 g
Fabco	2 mL
Ácido Acético (100%)	10,8 g
Complexo vitamínico***	19,8 mL

* Quantidades indicadas proporcional ao volume de 2.400 mL de água.

** A proteína de soja pode ser substituída por farelo de soja puro e livre de impurezas.

*** Niacinamida 1 g; pantotenato de cálcio 1 g; riboflavina 0,5 g; tiamina 0,25 g; piridoxina 0,25 g; ácido fólico 0,1 g; biotina 0,02 mg; cianocobalamina 0,35 g; 1 L de água.

O experimento consistiu da aplicação de 6 tratamentos (Tabela 2) com 20 repetições de cada. A calda de cada tratamento foi preparada 30 minutos antes de sua aplicação nas respectivas células.

Tabela 2. Tratamentos (controle químico e à base de *Bacillus thuringiensis*) aplicados para o controle de lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*). Uberlândia - MG, 2023.

Produto	Empresa	Composição
Engeo®	Syngenta	Tiametoxam (141 g L ⁻¹) + λ-Cialotrina (106 g L ⁻¹)
BtControl®	Simbiose	<i>B. thuringiensis</i> HD-1 e CCT 1306
Agree®	Bio Controle	<i>B. thuringiensis</i> var. <i>aizawai</i> GC 91
Dipel®	Sumitomo	<i>B. thuringiensis</i> var. <i>kurstaki</i> HD-1
Bioturim®	Total Biotec.	<i>B. thuringiensis</i> CCTB22, CCTB23 e CCTB25
Testemunha	- - -	Aplicação de água

A avaliação da área foliar da soja consumida pela lagarta-do-cartucho em cada célula foi feita digitalmente através da análise das imagens diárias de cada célula (20 células por tratamento). Nos dias 0, 1, 2 e 3, após a colocação de uma lagarta em cada célula, foram capturadas imagens RGB com a câmera digital multiespectral (modelo MAPIR Survey 3), a altura padrão de 0,3 m. No primeiro dia do experimento (dia 0), todas as células foram fotografadas para registrar o tamanho inicial das folhas. O experimento foi encerrado após a constatação de que todas as lagartas no tratamento químico (Engeo®) haviam morrido, o que inviabilizava a continuidade da avaliação nesse grupo. Essa decisão visou manter a uniformidade dos parâmetros de comparação entre os diferentes tratamentos, garantindo a validade estatística dos resultados obtidos.

A partir das imagens em RGB foi calculado o índice espectral VARI (Índice de Vegetação de Análise Visual) que é projetado para realçar as diferenças na vegetação visíveis ao olho humano, utilizando uma combinação das bandas vermelho, verde e azul (GITELSON et al., 2002). O VARI é calculado com base nos valores de refletância das regiões do vermelho (620 e 640 nm), verde (500 e 565 nm) e azul (450 e 485 nm), e calculado como: $VARI = (verde - vermelho) / (verde + vermelho - azul)$.

A segmentação das imagens ocorre pelo método de OTSU (1979) e determinação da área foliar com o software RStudio Team versão 2022.12.0 e o pacote PLIMAN® versão 2.1.0 (OLIVOTO, 2022). Esse pacote permite a medição da área foliar com base na contagem de pixels. A partir da diferença na quantidade de pixels ao longo dos dias, foi possível estimar a área foliar consumida pelas lagartas (%) que foi então determinada em relação a área foliar inicial. Os dados de área foliar da soja consumida pelas lagartas-do-cartucho em cada dia (APÊNDICE 1) foram submetidos à análise de variância de acordo com o modelo de medidas repetidas no tempo, para detecção do efeito de tratamentos. As médias de consumo foliar foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a captura da imagem RGB, seleção da área vegetal a ser avaliada e a geração do índice espectral foi possível observar que a imagem gerada pelo índice espectral VARI permitiu a distinção do tecido vegetal foliar para o que não era (Figura 2). A análise digital de imagens RGB, por meio do índice espectral VARI, demonstrou ser uma ferramenta eficaz na quantificação da área foliar consumida por lagartas. Essa abordagem permitiu a distinção precisa entre tecido vegetal saudável e áreas danificadas, facilitando a avaliação do impacto dos tratamentos inseticidas sobre o consumo foliar. A utilização de imagens digitais proporciona uma análise contínua e objetiva, essencial para estudos de monitoramento de pragas e avaliação de danos em culturas agrícolas.

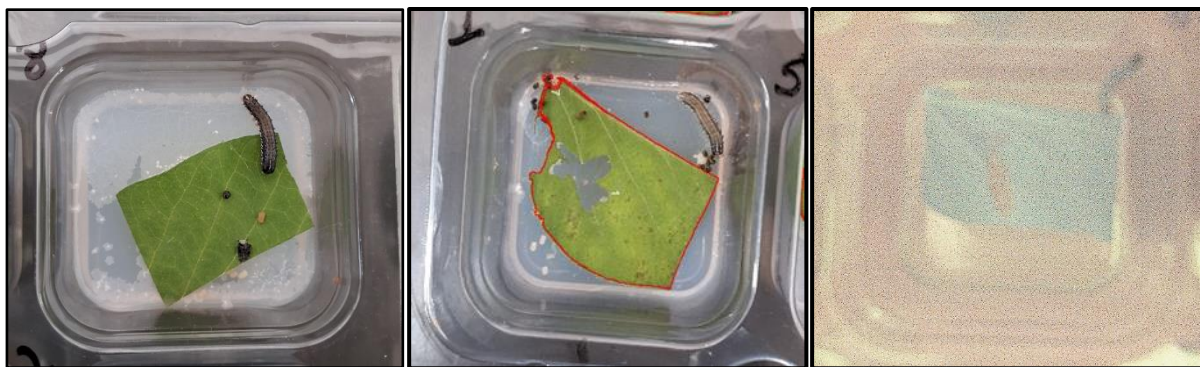


Figura 2. Imagem original em RGB (esquerda), delimitação da área a ser quantificada na imagem (centro) e imagem gerada com base no índice espectral VARI (direita) utilizada para quantificar a área foliar de soja consumida pela lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*).

Foi observada interação significativa ($p < 0.001$) entre os fatores inseticida e dias de avaliação para a área foliar da soja consumida pela lagarta-do-cartucho. A partir do segundo dia de avaliação as diferenças se acentuaram e se mantiveram entre os tratamentos inseticidas com relação à área foliar da soja consumida pela lagarta-do-cartucho. Estes resultados indicam que os inseticidas biológicos (BtControl®, Agree®, Dipel® e Bioturim®) ou químico (Engeo®) apresentaram efeitos rápidos dentro das primeiras 24 horas após sua aplicação e que estes efeitos não aumentam na mesma amplitude nos dias seguintes de avaliação.

A área foliar da soja consumida pela lagarta-do-cartucho em cada dia indicou a capacidade do índice espectral VARI em realçar a vegetação utilizando apenas as bandas do espectro visível (RGB) (Figura 2), o que o torna ideal para câmeras convencionais sem sensores

infravermelhos. Fato que pode ser observado pelos nítidos resultados de área foliar consumida pela lagarta-do-cartucho. Além disso, o VARI é menos sensível a variações de iluminação e efeitos atmosféricos, proporcionando resultados mais consistentes em condições de campo variadas (ENG et al., 2019). Comparado a outros índices que requerem sensores específicos, o VARI oferece uma solução acessível e eficiente para a avaliação da integridade vegetal e detecção de danos foliares.

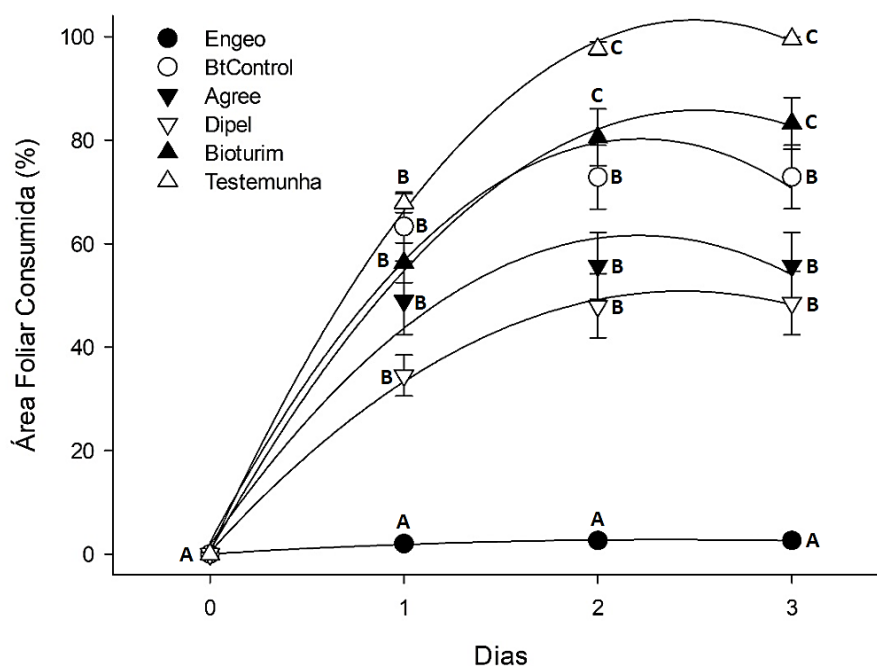


Figura 2. Área foliar da soja consumida média (%) por *Spodoptera frugiperda* em tratamentos inseticidas e avaliados em cada um dos dias consecutivos de avaliação. Pontos médios seguidos de mesma letra maiúscula não diferem entre si no mesmo dia de avaliação e para o mesmo inseticida pelo teste Tukey ($p > 0,05$). Temperatura média: 25 °C; fotoperíodo: 12 h. Uberlândia - MG, 2023.

Nos dias seguintes ao dia 0, o controle químico (Engeo®) obteve o melhor desempenho, limitando significativamente a área foliar consumida pela lagarta. A análise revelou que o controle químico apresentou um consumo médio de 2,6% da área foliar da soja enquanto que os bioinseticidas apresentaram eficácia variável, com o tratamento B2 e B3 apresentando desempenho intermediário, com cerca de 52,2% da área foliar da soja consumida, enquanto os tratamentos B1 e B4 foram menos eficientes, com cerca de 78,1% da área foliar da soja consumida. Em síntese, o inseticida químico reduziu o consumo foliar para menos de 3%

enquanto que os bioinseticidas tiveram consumos médios de área foliar superiores a 50%.

Em contrapartida aos resultados do controle químico, os tratamentos biológicos apresentaram eficácia intermediária (Dipel e Agree) ou baixa eficácia (BtControl e Bioturim). A testemunha apresentou praticamente 100% de consumo da área foliar do folíolo da soja, evidenciando o potencial destrutivo desse inseto-praga sem qualquer intervenção para o seu controle. A adoção de inseticidas biológicos tem sido amplamente estudada devido ao seu menor impacto ambiental e à capacidade de redução de populações de pragas sem causar resistência acelerada (ABBAS et al., 2022). No presente estudo, os resultados indicaram que nem todos os tratamentos com controle biológico apresentam o mesmo desempenho, necessitando de melhorias, por exemplo, em formulações e estratégias de aplicação.

O uso de agentes biológicos no controle de pragas é uma alternativa promissora dentro de uma estratégia de MIP, pois reduz a dependência de inseticidas químicos e seus impactos ambientais (BONATERRA et al., 2021; HE et al., 2021; ELNAHAL et al., 2022; LAHLALI et al., 2022; PANDIT et al., 2022; SÁNCHEZ-YÁÑEZ et al., 2022; ZHOU et al., 2024; RISEH et al., 2025); contudo, a eficiência de produtos biológicos pode ser influenciada por fatores como temperatura, umidade e interações ecológicas com a praga e o ambiente (ABBASZADEH et al., 2011).

Os controles biológicos formulados com *Bt* apresentaram eficácia intermediária neste estudo, possivelmente devido à variabilidade entre estirpes de *Bt* e às condições ambientais que influenciam sua atividade. A presença de antimicrobiano no meio ágar-água pode ter impactado negativamente o desempenho do controle biológico com *B. thuringiensis*. Embora esse antimicrobiano seja essencial para evitar o desenvolvimento de contaminantes que poderiam comprometer o experimento, a metodologia adotada permitiu uma possível contaminação inicial da lagarta pelos inseticidas estudados. Isso ocorreu porque a lagarta foi posicionada sobre um folíolo tratado, que por sua vez foi colocado sobre o ágar-água contendo antimicrobiano. Assim, nem todas as superfícies do folíolo ou a lagarta entraram em contato direto e imediato com o antimicrobiano, possibilitando uma exposição inicial aos controles biológicos (BtControl®, Agree®, Dipel® e Bioturim®) ou ao controle químico (Engeo®). Dessa forma, foi possível avaliar os efeitos dos tratamentos sobre a área foliar de soja consumida pela lagarta enquanto viva.

A seleção de estirpes mais adaptadas ao ambiente de cultivo também pode melhorar os resultados do controle biológico. Os resultados obtidos indicam a necessidade de

aprimoramento no uso da tecnologia *Bt* para o controle de *S. frugiperda*. O desenvolvimento de formulações otimizadas também é essencial para maximizar a eficácia desses produtos biológicos.

A combinação de diferentes estirpes de *Bt* ou sua associação com outros agentes entomopatogênicos ou mesmo com o controle químico pode igualmente melhorar a eficiência de controle de insetos-pragas (WANNA et al., 2012; GODOY et al., 2023; SMAGGHE et al., 2023; ABULIZI et al., 2024). A integração do controle biológico no MIP também é essencial para reduzir a pressão seletiva sobre populações de insetos resistentes aos inseticidas químicos (ELNAHAL et al., 2022; LAHLALI et al., 2022; MAURYA et al., 2022; SUAREZ-FERNANDEZ & DE FRANCESCO, 2024).

Diante da crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis, a pesquisa deve avançar na busca por formulações mais resistentes a variações climáticas, mais eficazes contra diferentes estágios das pragas e mais compatíveis com outros métodos de controle dentro do MIP. É fundamental também que os produtores recebam capacitação sobre a correta aplicação de produtos biológicos, garantindo sua eficácia no controle de pragas. Essas abordagens podem proporcionar um controle mais eficiente e duradouro, reduzindo a necessidade de aplicações frequentes.

Os produtos biológicos já são amplamente utilizados no manejo agrícola, oferecendo alternativas sustentáveis que favorecem a rotação de estratégias de controle e a harmonização da produção com o meio ambiente. Diferente dos agroquímicos convencionais, esses produtos preservam os inimigos naturais, contribuem para o manejo da resistência de pragas, reduzem o risco de contaminação hídrica e não deixam resíduos em alimentos destinados ao consumo humano e animal. No entanto, avanços na eficácia dos agentes microbiológicos ainda são necessários para que possam competir de maneira mais eficiente com os métodos químicos de controle.

Para futuras repetições deste experimento, recomenda-se que as avaliações sejam realizadas por um período mínimo de dois dias. Observou-se que as diferenças significativas no consumo foliar entre os tratamentos tornaram-se mais evidentes a partir do segundo dia, proporcionando dados mais robustos e confiáveis para a análise da eficácia dos inseticidas.

CONCLUSÕES

O índice espectral VARI, baseado exclusivamente em bandas do espectro visível (RGB) sob iluminação artificial, mostrou-se viável e acessível para distinguir tecido vegetal saudável de áreas danificadas e estimar com precisão a área foliar consumida por *Spodoptera frugiperda*; os resultados satisfatórios indicam que essa abordagem permite monitoramento contínuo e objetivo dos danos.

Observou-se interação significativa ($p < 0,001$) entre inseticida e tempo, com diferenças que se acentuam a partir do segundo dia, o que reforça a recomendação de avaliações mínimas de dois dias para diferenciar adequadamente a eficácia dos tratamentos.

O controle químico (Engeo®) reduziu o consumo médio de área foliar para 2,6%, enquanto os bioinseticidas Dipel® e Agree® apresentaram eficácia intermediária (~52% de área consumida) e BtControl® e Bioturim® foram menos eficientes (~78%), evidenciando o valor agregado da formulação e da dose química e a necessidade de otimizar produtos biológicos para um manejo integrado mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, A.; ULLAH, F.; HAFEEZ, M.; HAN, X.; DARA, M. Z. N.; GUL, H.; ZHAO, C. R. Biological control of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Agronomy*, v. 12, n. 11, p. 2704, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112704>
- ABBASZADEH, G.; DHILLON, M. K.; SRIVASTAVA, C.; GAUTAM, R. D. Effect of climatic factors on bioefficacy of biopesticides in insect pest management. *Biopesticides International*, v. 7, n. 1, p. 1-14, 2011. Disponível em: https://connectjournals.com/file_full_text/1143101H_1-14.pdf. Acesso em: 24 fev. 2025.
- ABULIZI, T.; PATIMA, W.; MA, Z.; WANG, H.; LU, Y.; FU, W.; LIU, F.; BUAYIXIAMU, W.; MA, D. Evaluation of the control effect of Bt-G033A mixed with 3 insect growth regulators on *Tuta absoluta* Meyrick. *Chinese Journal of Biological Control*, v. 40, n. 4, p. 770-775, 2024. <https://doi.org/10.16409/j.cnki.2095-039x.2024.02.043>.
- BAJOCCO, S.; GINALDI, F.; SAVIAN, F.; MORELLI, D.; SCAGLIONE, M.; FANCHINI, D.; RAPARELLI, E.; BREGAGLIO, S. U. M. On the Use of NDVI to Estimate LAI in Field Crops: Implementing a Conversion Equation Library. *Remote Sensing*, 2022, v. 14, n. 15, p. 3554. <https://doi.org/10.3390/rs14153554>
- BARBEDO, J. G. A.; KOENIGKAN, L. V.; SANTOS, T. T. Identifying multiple plant diseases using digital image processing. *Biosystems Engineering*, v. 147, p. 104-116, jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.012>
- BARCELLOS, G. A.; HANICH, M. R.; PRETTO, V. E.; WESCHENFELDER, M. A. G.; HORIKOSHI, R. J.; DOURADO, P. M.; OVEJERO, R. F. L.; BERGER, G. U.; MARTINELLI, S.; HEAD, G. P.; BERNARDI, O. Characterizing the lethal and sub-lethal effects of genetically modified soybean expressing Cry1A.105, Cry2Ab2, and Cry1Ac insecticidal proteins against *Spodoptera* species (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. *Pest Management Science*, 2023. <https://doi.org/10.1002/ps.7225>.
- BONATERRA, A.; BADOSA, E.; DARANAS, N.; FRANCÉS, J.; ROSELLÓ, G.; MONTESINOS, E. Bacteria as biological control agents of plant diseases. *Microorganisms*, v. 10, n. 9, p. 1759, 2022. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091759>.
- CARRIÈRE, Y.; BROWN, Z. S.; DOWNES, S. J.; REID, M.; DUNN, M.; ELSEY, M.; TABASHNIK, B. E.; WILLIAMS, J. L. Governing evolution: A socioecological comparison of resistance management for insecticidal transgenic *Bt* crops among four countries. *Ambio*, v. 49, p. 1-16, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01167-0>.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Brasília, DF, v. 12, safra 2024/25, n. 5, quinto levantamento, p. 1-107, fev. 2025. ISSN 2318-6852.
- DEBNATH, R.; GEORGE, J.; GAUTAM, M.; SHAFI, I.; KARIYAT, R.; REDDY, G. V. P. Ecological interactions, host plant defenses, and control strategies in managing soybean looper, *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae). *Frontiers in Insect Science*, v. 4, 11 dez. 2024. <https://doi.org/10.3389/finsc.2024.1480940>
- DIN, M.; ZHENG, W.; RASHID, M.; WANG, S.; SHI, Z. Evaluating hyperspectral vegetation indices for leaf area index estimation of *Oryza sativa* L. at diverse phenological stages. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00820>
- ELNAHAL, A. S. M.; EL-SAADONY, M. T.; SAAD, A. M.; DESOKY, E. S. M.; SALAMA, A. S.; SHERIF, M.; EL-ESAWY, H.; AL-JAHDALI, M. S.; BALEK, R. S.; EL-TARABILY, K. A.; RAGAB, T. I. The use of microbial inoculants for biological control,

- plant growth promotion, and sustainable agriculture: A review. *European Journal of Plant Pathology*, v. 162, p. 759-792, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02393-7>.
- ENG, L. S.; ISMAIL, R.; HASHIM, W.; BAHARUM, A. The use of VARI, GLI, and VIgreen formulas in detecting vegetation in aerial images. *International Journal of Technology*, v. 10, n. 7, p. 1385–1394, 2019. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i7.3275>
- FURLANETTO, J.; DAL FERRO, N.; LONGO, M.; LAI estimation through remotely sensed NDVI following hail defoliation in maize (*Zea mays* L.) using Sentinel-2 and UAV imagery. *Precision Agriculture*, v. 24, p. 1355-1379, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-09993-9>
- GASSMANN, A. J.; REISIG, D. D. Management of insect pests with *Bt* crops in the United States. *Annual Review of Entomology*, v. 68, p. 31-49, jan. 2023. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120220-105502>.
- GHIMIRE, B. K.; YU, C. Y.; KIM, W.-R.; MOON, H.-S.; LEE, J.; KIM, S. H.; CHUNG, I. M. Assessment of Benefits and Risk of Genetically Modified Plants and Products: Current Controversies and Perspective. *Sustainability*, v. 15, n. 2, p. 1722, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15021722>.
- GITELSON, A. A.; STARK, R.; GRITS, U.; RUNDQUIST, D.; KAUFMAN, Y.; DERRY, D. Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, n. 13, p. 2537-2562, jul. 2002. <https://doi.org/10.1080/01431160110107806>
- GODOY, D. N.; PRETTO, V. E.; DE ALMEIDA, P. G.; WESCHENFELDER, M. A. G.; WARPECHOWSKI, L. F.; HORIKOSHI, R. J.; MARTINELLI, S.; HEAD, G. P.; BERNARDI, O. Dose effects of flubendiamide and thiodicarb against *Spodoptera* species developing on Bt and non-Bt soybean. *Insects*, v. 14, n. 9, p. 766, 2023. <https://doi.org/10.3390/insects14090766>
- GODOY, D. N.; PRETTO, V. E.; WESCHENFELDER, M. A. G.; ALMEIDA, P. G.; WENDT, A. F.; PALHARINI, R. B.; REIS, A. C.; HORIKOSHI, R. J.; DOURADO, P. M.; MARTINELLI, S.; HEAD, G. P.; BERNARDI, O. Managing *Spodoptera* species (Lepidoptera: Noctuidae) found in Brazilian soybean fields with Bt soybean and insecticides. *Agronomy*, v. 12, n. 11, p. 2864, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112864>.
- GREENE, G. L.; LEPLA, N. C.; DICKERSON, W. A. Velvet bean caterpillar: a rearing procedure and artificial medium. *Journal of Economic Entomology*, v. 69, n. 4, p. 487-488, 1976. <https://doi.org/10.1093/jee/69.4.487>
- HAMMOND, R. B.; PEDIGO, L. P. Determination of Yield-Loss Relationships for Two Soybean Defoliators by Using Simulated Insect-Defoliation Techniques. *Journal of Economic Entomology*, v. 75, n. 1, p. 102-107, 1 fev. 1982. <https://doi.org/10.1093/jee/75.1.102>
- HE, D.-C.; HE, M.-H.; AMALIN, D. M.; LIU, W.; ALVINDIA, D. G.; ZHAN, J. Biological control of plant diseases: an evolutionary and eco-economic consideration. *Pathogens*, v. 10, n. 10, p. 1311, 2021. <https://doi.org/10.3390/pathogens10101311>.
- HECKEL, D. G. How do toxins from *Bacillus thuringiensis* kill insects? An evolutionary perspective. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, v. 104, n. 2, p. e21673, 2020. <https://doi.org/10.1002/arch.21673>.
- HORIKOSHI, R. J.; DOURADO, P. M.; BERGER, G. U.; LIMA, E. R.; NUNES, A. R.; MOREIRA, A. R.; ZANUNCIO, J. C.; PINTO, L. F. A.; GARCIA, R. S.; BAZZANELLA, V. C.; LACERDA, J. P. A. Large-scale assessment of lepidopteran

- soybean pests and efficacy of Cry1Ac soybean in Brazil. *Scientific Reports*, v. 11, p. 15956, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95483-9>.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- JURAT-FUENTES, J. L.; HECKEL, D. G.; FERRÉ, J. Mechanisms of resistance to insecticidal proteins from *Bacillus thuringiensis*. *Annual Review of Entomology*, v. 66, p. 121-140, 2021. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-052620-073348>.
- KUMAR, C. V. S. S. M.; JHA, S. S.; NIDAMANURI, R. R.; DADHWAL, V. K. Precision crop mapping: within plant canopy discrimination of crop and soil using multi-sensor hyperspectral imagery. *Scientific Reports*, [S.l.], v. 14, p. 24903, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75394-1>
- KUMAR, P.; KAMLE, M.; BORAH, R.; SINGH, N.; SHARMA, M.; CHOUDHURY, R. *Bacillus thuringiensis* as microbial biopesticide: uses and application for sustainable agriculture. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, v. 31, p. 95, 2021. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00440-3>.
- LAHLALI, R.; EZRARI, S.; RADOUANE, N.; KENFAOUI, J.; ESMAEEL, Q.; EL HAMSS, H.; BELABESS, Z.; BARKA, E. A. Biological control of plant pathogens: a global perspective. *Microorganisms*, v. 10, n. 3, p. 596, 2022. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596>.
- LIANG, W.; KIRK, K. R.; GREENE, J. K. Estimation of Soybean Leaf Area, Edge, and Defoliation Using Color Image Analysis. In: 2017 ASABE Annual International Meeting, Spokane, Washington, 16-19 jul. 2017. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers. Paper n° 1700061. <https://doi.org/10.13031/aim.201700061>
- MACHADO, B. B.; ORUE, J. P. M.; ARRUDA, M. S.; SANTOS, C. V.; SARATH, D. S.; GONCALVES, W. N.; SILVA, G. G.; PISTORI, H.; ROEL, A. R.; RODRIGUES-JR, J. F. BioLeaf: A professional mobile application to measure foliar damage caused by insect herbivory. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 129, p. 44-55, 1 nov. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.09.007>
- MACHADO, E. P.; RODRIGUES JUNIOR, G. L. dos S.; SOMAVILLA, J. C.; FÜHR, F. M.; ZAGO, S. L.; MARQUES, L. H.; SANTOS, A. C.; NOWATZKI, T.; DAHMER, M. L.; OMOTO, C.; BERNARDI, O. Survival and development of *Spodoptera eridania*, *Spodoptera cosmioides* and *Spodoptera albula* (Lepidoptera: Noctuidae) on genetically-modified soybean expressing Cry1Ac and Cry1F proteins. *Pest Management Science*, v. 76, n. 12, p. 4029-4035, 2020. <https://doi.org/10.1002/ps.5955>.
- MAURYA, R. P.; KORANGA, R.; SAMAL, I.; SINGH, R. K.; YADAV, A.; BHARDWAJ, A. K.; SINGH, A.; DEVI, P.; CHAUDHARY, S.; KUMAR, A.; KUMAR, P.; PANDEY, P.; KUMAR, V.; SINGH, M. K.; SAHOO, R. K.; SINGH, A. K.; CHAUDHARY, K. K.; VERMA, P.; NAYAK, D.; GOND, S. K.; KUMAR, D. Biological control: a global perspective. *International Journal of Tropical Insect Science*, v. 42, p. 3203-3220, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42690-022-00881-9>
- MOKHTARI, A.; NOORY, H.; VAZIFEDOUST, M. Improving crop yield estimation by assimilating LAI and inputting satellite-based surface incoming solar radiation into SWAP model. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 250-251, p. 159-170, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.250>
- NAZERI, B.; CRAWFORD, M. M.; TUINSTRA, M. R. Estimating leaf area index in row crops using wheel-based and airborne discrete return light detection and ranging data. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.740322>
- NGUGI, L. C.; ABELWAHAB, M.; ABO-ZAHHAD, M.. Recent advances in image processing

- techniques for automated leaf pest and disease recognition - A review. *Information Processing in Agriculture*, v. 8, n. 1, p. 27-51, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.04.004>
- NOACK, F.; SMITH, J.; WANG, L.; JONES, P.; MARTIN, R.; GARCÍA, H.; ZHANG, X. Environmental impacts of genetically modified crops. *Science*, v. 385, n. 6712, p. ado9340, 2024. <https://doi.org/10.1126/science.ado9340>.
- OERKE, E.-C.; DEHNE, H.-W. Safeguarding production — losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Protection*, v. 23, n. 4, p. 275-285, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.09.004>
- OLIVOTO, T. Lights, camera, pliman! An R package for plant image analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 13, n. 4, p. 789-798, 2022. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13803>
- OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 9(1), p. 62-66, 1979. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- PAINTER, R. H. The Economic Value and Biologic Significance of Insect Resistance in Plants. *Journal of Economic Entomology*, v. 34, n. 3, p. 358-367, 1 June 1941. <https://doi.org/10.1093/jee/34.3.358>
- PANDIT, M. A.; KUMAR, J.; GULATI, S.; BHANDARI, N.; MEHTA, P.; KATYAL, R.; RAWAT, C. D.; MISHRA, V.; KAUR, J. Major biological control strategies for plant pathogens. *Pathogens*, v. 11, n. 2, p. 273, 2022. <https://doi.org/10.3390/pathogens11020273>.
- RISEH, R. S.; FATHI, F.; VAZVANI, M. G.; TARKKA, M. T. Plant colonization by biocontrol bacteria and improved plant health: a review. *Frontiers in Bioscience (Landmark Edition)*, v. 30, n. 1, p. 23223, 2025. <https://doi.org/10.31083/FBL23223>.
- ROSEN, L.; EWING, P. M.; RUNCK, B. C. RGB-based indices for estimating cover crop biomass, nitrogen content, and carbon:nitrogen ratio. *Agronomy Journal*, [S.l.], v. 116, n. 6, p. 3070-3080, nov. 2024. <https://doi.org/10.1002/agj2.21657>
- ROWAN, G. B.; BOERMA, H. R.; ALL, J. N.; TODD, J. Soybean Cultivar Resistance to Defoliating Insects. *Crop Science*, v. 31, n. 3, p. 678-682, 1991. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100030027xa>
- SÁNCHEZ-YÁÑEZ, J. M.; GÓMEZ, I.; CANALES-DEL CASTILLO, R.; FLORES, H.; GILL, S. S.; SOBERÓN, M.; BRAVO, A. *Bacillus thuringiensis* (Bt) is more than a special agent for biological control of pests. *Revista Argentina de Microbiología*, v. 54, n. 1, p. 1-14, 2022. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/94097987/BTjmsy022622.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- SANTOS, V. L.; OLIVEIRA, J. A.; CRUZ, I. Utilização do *Bacillus thuringiensis* no controle biológico de pragas. *Revista Interdisciplinar de Ciências Aplicadas*, v. 2, n. 3, p. 1-10, 2015. Disponível em: <https://sou.ucs.br/etc/revistas/index.php/ricaucs/article/download/4304/2469/16039>. Acesso em: 22 fev. 2025.
- SHELKE, D. B.; CHAMBHARE, M. R.; NIKALJE, G. C.; NIKAM, T. D. Improvement of soybean crop for yield stress tolerance and value-added products using a transgenic approach. *Advances in Agriculture*, v. 2023, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/8166928>.

- SISSON, A. J.; MUELLER, D. S. Training Resource for Improvement of Visual Assessment of Field Crop Disease and Insect Defoliation Severity. *PhytoFrontiers*, v. 3, n. 1, p. 70-71, jan. 2023. <https://doi.org/10.1094/PHYTOFR-11-22-0125-A>
- SMAGGHE, F.; SPOONER-HART, R.; CHEN, Z.-H.; DONOVAN-MAK, M. Biological control of arthropod pests in protected cropping by employing entomopathogens: Efficiency, production and safety. *Biological Control*, v. 186, p. 105337, nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105337>.
- SUAREZ-FERNANDEZ, M.; DE FRANCESCO, A. Embracing biological control of *Septoria tritici* blotch for sustainable wheat protection. *Journal of Phytopathology*, 2024. <https://doi.org/10.1111/jph.13395>
- TABASHNIK, B. E.; FABRICK, J. A.; CARRIÈRE, Y. Global patterns of insect resistance to transgenic *Bt* crops: The First 25 Years. *Journal of Economic Entomology*, v. 116, n. 2, p. 297-309, abr. 2023. <https://doi.org/10.1093/jee/toac183>.
- TYAGI, S.; KESIRAJU, K.; SAAKRE, M.; RATHINAM, M.; RAMAN, V.; PATTANAYAK, D.; SREEVATHSA, R. Genome editing for resistance to insect pests: an emerging tool for crop improvement. *ACS Omega*, v. 5, n. 33, p. 20674-20683, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01435>.
- VAN DUYN, J. W.; TURNIPSEED, S. G.; MAXWELL, J. D. Resistance in Soybeans to the Mexican Bean Beetle. I. Sources of Resistance. *Crop Science*, v. 11, n. 4, p. 572-573, jul. 1971. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100040035x>
- WANNA, R.; XU, ZHIHONG; YU, HAIXIN. Bioefficacy of a mixed biocide BtA against *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) and its contact toxicity to pupae and adults of parasitoid *Microplitis mediator* (Hymenoptera: Braconidae). *Acta Entomologica Sinica*, v. 55, n. 8, p. 941-949, 2012.
- WEISS, M.; JACOB, F.; DUVEILLER, G. Remote sensing for agricultural applications: a meta-review. *Remote Sensing of Environment*, [S.l.], v. 236, p. 111402, jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
- ZHOU, W.; ARCOT, Y.; MEDINA, R. F.; BERNAL, J.; CISNEROS-ZEVALLOS, L.; AKBULUT, M. E. S. Integrated pest management: an update on the sustainability approach to crop protection. *ACS Omega*, v. 9, n. 40, p. 41130-41147, 2024. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06628>.

APÊNDICE 1

Conjunto original dos dados desse estudo:

Inseticida	Rep.	Dia	Dano	Dia	Dano	Dia	Dano	Dia	Dano
Engeo	1	0	0,00	1	0,77	2	1,37	3	1,37
Engeo	2	0	0,00	1	0,64	2	1,43	3	1,43
Engeo	3	0	0,00	1	7,01	2	9,46	3	9,46
Engeo	4	0	0,00	1	0,62	2	0,63	3	0,63
Engeo	5	0	0,00	1	0,87	2	6,13	3	6,13
Engeo	6	0	0,00	1	0,43	2	0,84	3	0,84
Engeo	7	0	0,00	1	3,17	2	5,59	3	5,59
Engeo	8	0	0,00	1	4,81	2	2,97	3	2,97
Engeo	9	0	0,00	1	0,21	2	1,12	3	1,12
Engeo	10	0	0,00	1	3,32	2	1,70	3	1,70
Engeo	11	0	0,00	1	2,50	2	2,67	3	2,67
Engeo	12	0	0,00	1	1,97	2	1,95	3	1,95
Engeo	13	0	0,00	1	1,87	2	0,60	3	0,60
Engeo	14	0	0,00	1	1,97	2	2,02	3	2,02
Engeo	15	0	0,00	1	1,62	2	2,91	3	2,91
Engeo	16	0	0,00	1	0,79	2	0,81	3	0,81
Engeo	17	0	0,00	1	0,85	2	3,76	3	3,76
Engeo	18	0	0,00	1	3,76	2	3,44	3	3,44
Engeo	19	0	0,00	1	0,94	2	0,98	3	0,98
Engeo	20	0	0,00	1	2,07	2	2,31	3	2,31
BtControl	1	0	0,00	1	78,31	2	84,70	3	84,72
BtControl	2	0	0,00	1	83,32	2	84,34	3	84,34
BtControl	3	0	0,00	1	14,98	2	36,19	3	36,19
BtControl	4	0	0,00	1	77,36	2	84,55	3	84,55
BtControl	5	0	0,00	1	53,36	2	82,33	3	82,70
BtControl	6	0	0,00	1	100,00	2	100,00	3	100,00
BtControl	7	0	0,00	1	42,62	2	46,85	3	46,85
BtControl	8	0	0,00	1	49,91	2	57,45	3	57,44
BtControl	9	0	0,00	1	87,11	2	88,44	3	88,44
BtControl	10	0	0,00	1	51,52	2	88,61	3	88,62
BtControl	11	0	0,00	1	5,43	2	8,23	3	8,24
BtControl	12	0	0,00	1	100,00	2	100,00	3	100,00
BtControl	13	0	0,00	1	59,32	2	77,98	3	78,09
BtControl	14	0	0,00	1	43,49	2	57,12	3	57,12
BtControl	15	0	0,00	1	35,54	2	50,74	3	50,75
BtControl	16	0	0,00	1	95,33	2	98,59	3	98,59
BtControl	17	0	0,00	1	28,28	2	24,37	3	24,37
BtControl	18	0	0,00	1	100,00	2	100,00	3	100,00
BtControl	19	0	0,00	1	98,95	2	99,64	3	99,67
BtControl	20	0	0,00	1	61,37	2	86,89	3	86,89

Agree	1	0	0,00	1	96,77	2	100,00	3	100,00
Agree	2	0	0,00	1	11,47	2	17,96	3	17,96
Agree	3	0	0,00	1	100,00	2	100,00	3	100,00
Agree	4	0	0,00	1	67,21	2	75,38	3	75,38
Agree	5	0	0,00	1	30,46	2	44,46	3	44,46
Agree	6	0	0,00	1	60,60	2	67,58	3	67,58
Agree	7	0	0,00	1	51,02	2	52,20	3	52,20
Agree	8	0	0,00	1	9,57	2	8,93	3	8,93
Agree	9	0	0,00	1	22,31	2	21,87	3	21,89
Agree	10	0	0,00	1	35,63	2	36,16	3	36,16
Agree	11	0	0,00	1	77,81	2	84,80	3	84,82
Agree	12	0	0,00	1	72,74	2	82,99	3	82,99
Agree	13	0	0,00	1	29,33	2	33,30	3	33,30
Agree	14	0	0,00	1	48,45	2	51,92	3	51,92
Agree	15	0	0,00	1	53,60	2	69,62	3	69,62
Agree	16	0	0,00	1	21,36	2	42,70	3	42,69
Agree	17	0	0,00	1	100,00	2	100,00	3	100,00
Agree	18	0	0,00	1	24,03	2	30,98	3	30,98
Agree	19	0	0,00	1	17,73	2	27,78	3	27,78
Agree	20	0	0,00	1	49,27	2	66,67	3	66,67
Dipel	1	0	0,00	1	39,57	2	67,51	3	68,35
Dipel	2	0	0,00	1	12,68	2	19,74	3	20,11
Dipel	3	0	0,00	1	24,40	2	45,73	3	45,73
Dipel	4	0	0,00	1	32,59	2	47,50	3	51,37
Dipel	5	0	0,00	1	67,19	2	100,00	3	100,00
Dipel	6	0	0,00	1	29,90	2	32,16	3	32,39
Dipel	7	0	0,00	1	2,26	2	4,36	3	4,74
Dipel	8	0	0,00	1	23,55	2	27,40	3	28,56
Dipel	9	0	0,00	1	23,90	2	30,62	3	30,56
Dipel	10	0	0,00	1	36,02	2	38,48	3	39,93
Dipel	11	0	0,00	1	17,51	2	26,53	3	26,53
Dipel	12	0	0,00	1	27,98	2	31,47	3	31,48
Dipel	13	0	0,00	1	22,52	2	38,26	3	38,30
Dipel	14	0	0,00	1	30,81	2	42,78	3	43,57
Dipel	15	0	0,00	1	23,74	2	33,54	3	33,60
Dipel	16	0	0,00	1	47,66	2	32,01	3	33,12
Dipel	17	0	0,00	1	46,68	2	76,65	3	77,60
Dipel	18	0	0,00	1	61,15	2	65,27	3	65,26
Dipel	19	0	0,00	1	68,02	2	100,00	3	100,00
Dipel	20	0	0,00	1	52,40	2	100,00	3	100,00
Bioturim	1	0	0,00	1	67,02	2	100,00	3	100,00
Bioturim	2	0	0,00	1	63,06	2	97,78	3	100,00
Bioturim	3	0	0,00	1	71,67	2	100,00	3	100,00
Bioturim	4	0	0,00	1	82,14	2	100,00	3	100,00

Bioturim	5	0	0,00	1	58,38	2	85,09	3	87,80
Bioturim	6	0	0,00	1	38,95	2	55,96	3	62,24
Bioturim	7	0	0,00	1	68,92	2	100,00	3	100,00
Bioturim	8	0	0,00	1	48,57	2	58,62	3	63,72
Bioturim	9	0	0,00	1	21,80	2	39,51	3	50,97
Bioturim	10	0	0,00	1	79,33	2	100,00	3	100,00
Bioturim	11	0	0,00	1	54,06	2	66,47	3	73,05
Bioturim	12	0	0,00	1	38,97	2	62,04	3	71,34
Bioturim	13	0	0,00	1	49,45	2	100,00	3	100,00
Bioturim	14	0	0,00	1	52,21	2	57,02	3	61,54
Bioturim	15	0	0,00	1	20,77	2	19,93	3	21,04
Bioturim	16	0	0,00	1	73,54	2	100,00	3	100,00
Bioturim	17	0	0,00	1	50,67	2	100,00	3	100,00
Bioturim	18	0	0,00	1	64,43	2	100,00	3	100,00
Bioturim	19	0	0,00	1	71,23	2	92,02	3	93,00
Bioturim	20	0	0,00	1	51,29	2	76,17	3	79,88
Testemunha	1	0	0,00	1	70,30	2	100,00	3	100,00
Testemunha	2	0	0,00	1	78,81	2	100,00	3	100,00
Testemunha	3	0	0,00	1	62,18	2	100,00	3	100,00
Testemunha	4	0	0,00	1	64,05	2	92,53	3	100,00
Testemunha	5	0	0,00	1	60,14	2	100,00	3	100,00
Testemunha	6	0	0,00	1	75,59	2	100,00	3	100,00
Testemunha	7	0	0,00	1	54,91	2	75,83	3	100,00
Testemunha	8	0	0,00	1	58,78	2	95,09	3	99,14
Testemunha	9	0	0,00	1	71,84	2	100,00	3	100,00
Testemunha	10	0	0,00	1	75,88	2	100,00	3	100,00
Testemunha	11	0	0,00	1	75,82	2	100,00	3	100,00
Testemunha	12	0	0,00	1	66,17	2	100,00	3	100,00
Testemunha	13	0	0,00	1	65,39	2	100,00	3	100,00
Testemunha	14	0	0,00	1	59,39	2	100,00	3	100,00
Testemunha	15	0	0,00	1	85,27	2	100,00	3	100,00
Testemunha	16	0	0,00	1	59,86	2	89,55	3	91,66
Testemunha	17	0	0,00	1	64,86	2	100,00	3	100,00
Testemunha	18	0	0,00	1	63,87	2	100,00	3	100,00
Testemunha	19	0	0,00	1	72,25	2	100,00	3	100,00
Testemunha	20	0	0,00	1	71,06	2	100,00	3	100,00