

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

Relatório Final - Pós Doutorado

**MODELO BIOECONÔMICO PARA A GESTÃO DE PRAGAS NA
CANA-DE-AÇÚCAR**

Alex Rengifo Rojas

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” (UNESP), FCAV -
Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias - Câmpus de Jaboticabal

Supervisor: David Ferreira Lopes Santos.

PROPE/UNESP – 11/2024

**Jaboticabal-SP
2026**

Apresentação

Os estudos de pós-doutorado foram conduzidos na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), no departamento acadêmico de Ciências Econômicas, Administrativas e Educacionais da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, campus de Jaboticabal. Durante esse período, foram desenvolvidos três artigos científicos que abordam problemas agrícolas sob perspectivas interdisciplinares.

O primeiro artigo consistiu em uma revisão sistemática da literatura científica disponível no Scopus sobre a praga *Sphenophorus levis*. Após um rigoroso processo de seleção, 35 artigos foram identificados e analisados, abrangendo desde a primeira publicação registrada em 2003 até março de 2025. A análise permitiu uma síntese do conhecimento existente sobre a biologia e o comportamento dessa praga, particularmente sobre seu impacto no cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, Brasil. Além disso, identificou-se uma linha de pesquisa emergente sobre o potencial de uso de insetos na indústria alimentícia, que apresenta uma abordagem inovadora que transcende o manejo puramente fitossanitário.

O segundo artigo apresenta uma revisão sistemática de 58 publicações indexadas no Scopus (até março de 2025) sobre modelagem bioeconômica. Essa abordagem integra variáveis biológicas, econômicas, ambientais e sociais, incluindo dimensões-chave, como a conscientização e a educação dos agricultores. A revisão examina como métodos matemáticos, econométricos e de teoria dos jogos têm sido empregados para modelar o comportamento de pragas e de seus predadores em sistemas agrícolas. Esses modelos são cruciais para prever interações ecológicas e econômicas, mostrando como o comportamento das pragas pode afetar negativamente a rentabilidade e a sustentabilidade das culturas e ressaltando a importância de incorporar o fator humano às estratégias de manejo integrado.

O terceiro artigo é um estudo empírico baseado em dados privados de um empreendimento sucroenergético no Centro-Sul do Brasil. Um total de 2.738 parcelas foi analisado para avaliar a produtividade da cana-de-açúcar, e 2.772, para estudar a incidência da infestação por *Sphenophorus levis* (bicudo da cana-de-açúcar). Por meio de regressão linear múltipla com estimação de parâmetros por mínimos quadrados generalizados, essas relações foram quantificadas e modeladas. Os modelos passaram com sucesso pelos testes de validação e robustez, fornecendo uma ferramenta quantitativa confiável para a tomada de decisões no manejo agrônomo e econômico dessa cultura diante dessa praga.

Este trabalho de pós-doutorado foi possível graças ao amplo apoio da UNESP, cujo financiamento contínuo foi fundamental para alcançar os objetivos com o máximo rigor científico. Essa conquista baseia-se não apenas na infraestrutura e nos recursos fornecidos pela instituição, mas também na valiosa orientação do meu supervisor, cujo aconselhamento especializado foi indispensável para o sucesso da pesquisa. Meu aprendizado prévio e a experiência adquirida durante esse período consolidaram minhas habilidades como pesquisador, permitindo-me integrar conhecimentos de diversas disciplinas para fornecer soluções científicas a problemas complexos no setor agrícola.

Artigo 1

***Sphenophorus levis* como ameaça à cana-de-açúcar: uma revisão sistemática da literatura sobre estratégias de manejo sustentável**

Título abreviado: Estratégias de estudo e controle de *Sphenophorus levis*

Alex Rengifo Rojas

Universidade Nacional Agrária da Selva, Peru, Departamento Acadêmico de Ciências Econômicas, Tingo María, 10131 e Universidade Estadual Paulista, Brasil, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Centro de Pesquisa em Engenharia – Fitossanidade em Cana-de-Açúcar.

<https://orcid.org/0000-0002-7103-6903>

E-mail: alex.rengifo@unas.edu.pe

Nelino Florida Rofner

Universidade Nacional Agrária da Selva, Peru, Departamento Acadêmico de Ciências da Conservação do Solo e da Água, Tingo María, 10131.

<https://orcid.org/0000-0002-8751-4367>

E-mail: nelino.florida@unas.edu.pe

Odair Aparecido Fernandes

Universidade Estadual Paulista, Brasil, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Centro de Pesquisa em Engenharia – Fitossanidade em Cana-de-Açúcar, Jaboticabal, 14884-900.

<https://orcid.org/0000-0003-3489-4754>

E-mail: odair.fernandes@unesp.br

Ricardo Antonio Polanczyk

Universidade Estadual Paulista, Brasil, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Centro de Pesquisa em Engenharia – Fitossanidade em Cana-de-Açúcar, Jaboticabal, 14884-900.

<https://orcid.org/0000-0003-0769-9902>

E-mail: r.polanczyk@unesp.br

David Ferreira Lopes Santos.

Universidade Estadual Paulista, Brasil, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Centro de Pesquisa em Engenharia – Fitossanidade em Cana-de-Açúcar, Jaboticabal, 14884-900.

<https://orcid.org/0000-0003-3890-6417>

E-mail: david.lopes@unesp.br

Resumo

Sphenophorus levis é uma praga endêmica da cana-de-açúcar em países da América do Sul, principalmente no Brasil, onde causa prejuízos econômicos significativos. Seu manejo tem se baseado principalmente em pesticidas químicos, que apresentam eficácia limitada no controle da praga, além de causar efeitos adversos ao meio ambiente e à saúde humana. Este estudo avaliou a literatura científica indexada no Scopus sobre *S. levis* para analisar estratégias de controle sustentável e apontar direções para a pesquisa e o desenvolvimento. Diferentes métodos quantitativos foram combinados para conduzir uma revisão sistemática aprofundada da literatura. Os resultados destacam o potencial das enzimas digestivas do inseto como sinalizadores para inibidores enzimáticos, o que poderia facilitar o desenvolvimento de

abordagens biotecnológicas, incluindo o melhoramento genético da cana-de-açúcar. O controle isolado da praga (químico, biológico ou práticas culturais) apresentou baixa eficácia, enquanto o manejo integrado, priorizando o controle biológico com bioinseticidas (nematóides, *Bacillus thuringiensis*) e práticas agrícolas, reservando os pesticidas para surtos severos, deve levar a melhores resultados. Do ponto de vista da ecologia aplicada, propõe-se a modificação de habitats para desencorajar a proliferação de bicudos, explorando interações bióticas por meio de semioquímicos e inimigos naturais, e implementando o monitoramento baseado na biodiversidade. A identificação do (S)-2-metil-4-octanol na sinalização química de insetos abre oportunidades para o uso de feromônios e caiofônios em estratégias ecológicas. Além disso, a biotecnologia (planta Bt) oferece soluções inovadoras, como bioinsumos, engenharia genética e agricultura de precisão, ampliando os limites dos métodos convencionais. Sua implementação requer uma avaliação rigorosa da relação custo-benefício de cada estratégia, bem como a transferência de tecnologia e a adoção de marcos regulatórios que encontrem um equilíbrio entre inovação e sustentabilidade.

Palavras-chave: Biotecnologia, controle de pragas, produção agrícola, manejo integrado de pragas (MIP), pesticida, semioquímicos.

Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, responsável por 33,91% da produção global (FAO, 2024). Essa matéria-prima tem significativa importância econômica e energética para o Brasil. É uma fonte alimentar vital para o mundo, representando 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, gerando mais de 1 milhão de empregos diretos, respondendo por 18% da matriz energética brasileira e constituindo 16,38% do açúcar exportado globalmente.

Apesar da importância econômica e da tradição da cana-de-açúcar no Brasil (mais de 500 anos), os desafios fitossanitários são significativos, dada a possibilidade de ocorrência de mais de 30 insetos-praga com impactos que podem resultar em perdas de produção de 30% a 80% (Santos-Cividanes *et al.*, 2022). O principal inseto-praga de preocupação no cultivo da cana-de-açúcar no Centro-Sul do Brasil na década de 2020 é o bicudo-da-cana, *Sphenophorus levis*, cujas práticas de manejo continuam a apresentar resultados controversos ou inconclusivos, com perdas estimadas entre 20% e 30% em casos de alta infestação.

S. levis é uma praga do tipo bicudo que afeta as raízes e os colmos da cana-de-açúcar na Argentina, no Brasil e no Paraguai (Barreto-Triana *et al.*, 2014). Os adultos são atraídos por iscas com melaço fermentado (24-48 h) por meio de estímulos olfativos durante o dia, período em que se alimentam (Girón-Pérez *et al.*, 2009). No entanto, suas atividades críticas (caminhada, escavação e reprodução) ocorrem predominantemente à noite, o que limita a eficácia de inseticidas diurnos, pois reduz a exposição dos indivíduos (Ferreira & Ferreira, 2023). Os danos incluem necrose vascular e mortalidade de brotos e plantas, com maior atração pela vinhaça (um subproduto do etanol), que afeta os tecidos vegetais (Martins *et al.*, 2020).

O desenvolvimento larval do rizoma (Soares-Costa *et al.*, 2011) reduz o peso do caule em 0,318% e a brotação em 0,68% (Casteliani *et al.*, 2020). Durante a colheita, a dispersão atinge 740 m, com uma taxa de crescimento populacional de 11,96%, facilitada por resíduos vegetais fermentados que servem como atrativos (Rosa *et al.*, 2024).

Dentre as estratégias químicas, a combinação lambda-cialotrina/tiametoxam atinge eficácia de 76,70% em adultos em Jaboticabal, São Paulo (Ferreira *et al.*, 2024). No entanto, sua eficácia cai para 212-282 g/ha, pois não penetra nos rizomas (Urach Ferreira & Ferreira, 2023), corroborando a ineficácia contra pragas protegidas em substratos (Soares-Costa *et al.*, 2011).

Alternativamente, nematoides entomopatogênicos, como *Steinernema carpocapsae*, induzem 60% de mortalidade em larvas/pupas (**Casteliani et al., 2020**). Em contrapartida, *S. rarum* com vinhaça atinge 50-74% de controle larval, mantendo eficácia superior a 80% aos 37 dias (**Leite et al., 2023; Silva et al., 2021**). O *Bacillus thuringiensis* apresenta 70% de eficácia em adultos, por meio das proteínas Cry, que danificam irreversivelmente o trato digestivo das larvas (**Campanini et al., 2012; Cícero et al., 2009**). Cepas como *Steinernema brazilense* IBCB n6 e *Heterorhabditis spp.* apresentam virulência variável (20-45%) em adultos (**Giometti et al., 2011**).

Sistemas integrados combinam limiares de intervenção diferenciados: 5,93% (químico) e 4,15% (biológico) em áreas de sequeiro e 4,85% e 3,40% em áreas irrigadas (**Xavier et al., 2024**). Sinergias como a de *S. brazilense* com fipronil (78%) ou tiametoxam (83%) controlam 50% das larvas (**Leite et al., 2012**). Práticas culturais apresentam resultados contrastantes: a colheita verde aumenta as populações de *S. levis* e de *Mahanarva fimbriolata* (**Dinardo-Miranda & Fracasso, 2013**), enquanto a remoção da palha é eficaz, especialmente em solos argilosos, em comparação com solos arenosos, com infestações triplas (**De Castro et al., 2019**).

A persistência das infestações está ligada à biologia reprodutiva, com a máxima eficiência entre 14 e 35 dias (76-88% de cópula), o que requer nutrição pré-reprodutiva ideal (**Barreto-Triana et al., 2014**). Inovações genéticas incluem a cana transgênica SP80-185, que expressa CaneCPI-1 e reduz o peso larval em 50% por meio da inibição das peptidases de cisteína (**Ribeiro et al., 2008; Schneider et al., 2017**). Estudos enzimáticos revelam que SI-CathL (ativo em pH 6,0/37 °C) interage com CaneCPI-4, interrompendo a digestão do amido no intestino médio (**Fonseca et al., 2012; Rinke et al., 2011; Shibao et al., 2021; Soares-Costa et al., 2011**). Outras estratégias empregam dsRNA contra a V-ATPase E para reduzir a mortalidade larval (**Mohan et al., 2021**) ou leviserpina para inibir enzimas larvais (**Fonseca et al., 2011**).

A plasticidade metabólica de *S. levis* abrange enzimas adquiridas horizontalmente, como SI-PME e SI-endoPG, que degradam as paredes celulares (**Evangelista et al., 2015**), bem como β -frutofuranosidase, que processa açúcares (**Pedezi et al., 2014**). Dietas artificiais com caseína/ágar promovem uma taxa de sobrevivência de ovos a adultos de 60%, enquanto o bagaço é prejudicial (**Faria et al., 2024**). O (S)-2-metil-4-octanol, um feromônio de agregação masculina (**Zarbin et al., 2003**), surge como um atrativo para armadilhas sustentáveis (**Zarbin et al., 2004**).

As aplicações industriais potenciais incluem o uso de suas pectinas metilesterases e endopoligalacturonases no processamento de alimentos e na produção de biocombustíveis (**Evangelista et al., 2014; Habrylo et al., 2018**), bem como o potencial para o controle da espécie Liogonyleptoides inermis colhida (**Peixoto et al., 2024**). Perdas econômicas (20-30 t/ha; **Barreto-Triana et al., 2014**) impulsionaram o desenvolvimento de tecnologias, como o mapeamento espacial com GNSS, que melhoram o controle durante a semeadura em 27,16% (**Noronha et al., 2019; Pavlu & Molin, 2016**).

A distribuição confirmada de *S. levis* está atualmente restrita ao Brasil, com registros documentados em São Paulo (de 2003 a 2024), Minas Gerais (**Xavier et al., 2024**), Mato Grosso do Sul, onde apresenta constância de 14,60% e frequência relativa de 0,70% em amostragens recentes (**Ávila et al., 2023**), e Goiás (Fernandes, comunicação pessoal). As evidências científicas acumuladas posicionam essa espécie como uma praga de significativa importância econômica para o cultivo da cana-de-açúcar, cuja complexa ecologia comportamental — caracterizada por hábitos crípticos, resistência a inseticidas e resposta diferencial a compostos fermentados — tem exigido o desenvolvimento de estratégias de controle multifacetadas.

Contudo, a falta de protocolos padronizados e a variabilidade na eficácia relatada dos métodos empregados (de químicos a biotecnológicos) ressaltam a necessidade crítica de uma síntese abrangente do conhecimento disponível. Portanto, este estudo avaliou a literatura científica indexada no Scopus sobre *S. levis* para analisar estratégias de controle sustentável e indicar direções para pesquisa e desenvolvimento. Esta pesquisa visa estabelecer um arcabouço científico para o manejo eficaz de *S. levis*, alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), particularmente o ODS 2 (Acabar com a fome e promover a agricultura sustentável), especificamente o objetivo 2.4 (garantir sistemas de produção de alimentos sustentáveis e implementar práticas agrícolas resilientes que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas e que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas) (Nações Unidas, 2024). A integração dessas abordagens representa uma via promissora para reduzir as perdas econômicas e, ao mesmo tempo, promover práticas agrícolas sustentáveis.

Materiais e métodos

Desenho de revisão sistemática da literatura

Este estudo empregou uma revisão sistemática como metodologia central, com base nos trabalhos de Chiappetta Jabbour (2013) e Page et al. (2021), para sintetizar criticamente as evidências científicas disponíveis sobre *Sphenophorus levis* na base de dados Scopus. Essa abordagem permite orientar pesquisas futuras com o objetivo de:

- Aprofundar o conhecimento biológico da praga.
- Avaliar seu papel nos agroecossistemas (como praga, predador ou organismo cooperador).
- Explorar potenciais aplicações na indústria alimentícia e na agricultura sustentável.

O processo metodológico, detalhado na Figura 1, seguiu protocolos padronizados para garantir a integridade e a reprodutibilidade.

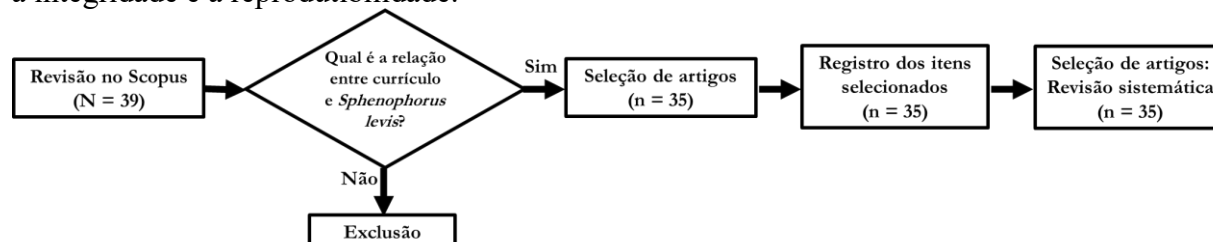


Figura 1. Fluxograma do processo de identificação e seleção de estudos sobre *S. levis* seguindo o PRISMA (2020).

A estratégia de busca foi implementada no Scopus utilizando o descritor composto "*Sphenophorus levis*" (com limite temporal de junho de 2025), identificando uma população inicial de N = 39 artigos. Após a triagem de títulos e resumos segundo os critérios PRISMA, quatro (4) estudos foram excluídos por irrelevância temática (Figura 1) (Page et al., 2021). Os 35 artigos restantes (amostra final: n = 35) foram gerenciados no Mendeley para padronização bibliográfica. Posteriormente, uma matriz de extração de dados foi elaborada no Microsoft Excel para sintetizar as principais evidências e subsidiar a análise crítica da literatura (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação, relevância e criptografia dos artigos científicos selecionados

Classificação	Relevância	Criptografia
1	Tópico principal	A – Enzimologia
		B – Controle de Pragas
		C – Ecologia Aplicada
		D – Sinalização Química
		E – Biotecnologia

2	Tipo de estudo	A – Estudo teórico
		B – Quantitativo
		C – Qualitativo
		D – Combinação de métodos quantitativos e qualitativos
		E – Bibliometria/revisão
3	Desenho	A – Série temporal
		B – Corte transversal
		C – Painel de dados
		D – Experimento
		E – Bibliográfico
4	Resultados	A – Novas conclusões
		B – Consistência com a bibliografia
		C – Elas conflitam com a literatura

Essa classificação tripla permitiu uma análise estruturada do corpus bibliográfico, garantindo que cada artigo fosse categorizado conforme suas características metodológicas e contribuições substantivas.

Esta revisão sistemática baseou-se exclusivamente no Scopus devido a:

- Sua cobertura especializada e qualidade editorial em ciências biológicas e agrícolas ([Mongeon & Paul-Hus, 2016](#)), onde se concentra a literatura sobre *S. levis*.
- Um algoritmo de busca de alta precisão (taxa de falsos positivos: 0,90%; n/N; Figura 1) com filtros avançados para a recuperação ideal de estudos relevantes.
- Validação metodológica em agrociências: o Scopus recupera entre 92% e 98% da literatura principal e reduz a redundância em comparação com o Web of Science ([Martín-Martín et al., 2021](#)).

Usando o VOSviewer

Após a busca sistemática no Scopus com o descritor predefinido, os resultados foram exportados em formato CSV para posterior análise no software VOSviewer (versão 1.6.20). Esta ferramenta de análise bibliométrica permitiu a construção e a visualização de redes de coautoria e de coocorrência de termos. Para a análise de coautoria, foram estabelecidos os seguintes parâmetros: (1) unidade de análise: autores; (2) limiar mínimo: 1 artigo por autor. Esta abordagem identificou 49 autores conectados por meio de redes colaborativas, dos quais 9 autores principais de destaque (Figura 2A). A métrica de força de vínculo foi calculada a partir da força total das conexões entre os coautores.

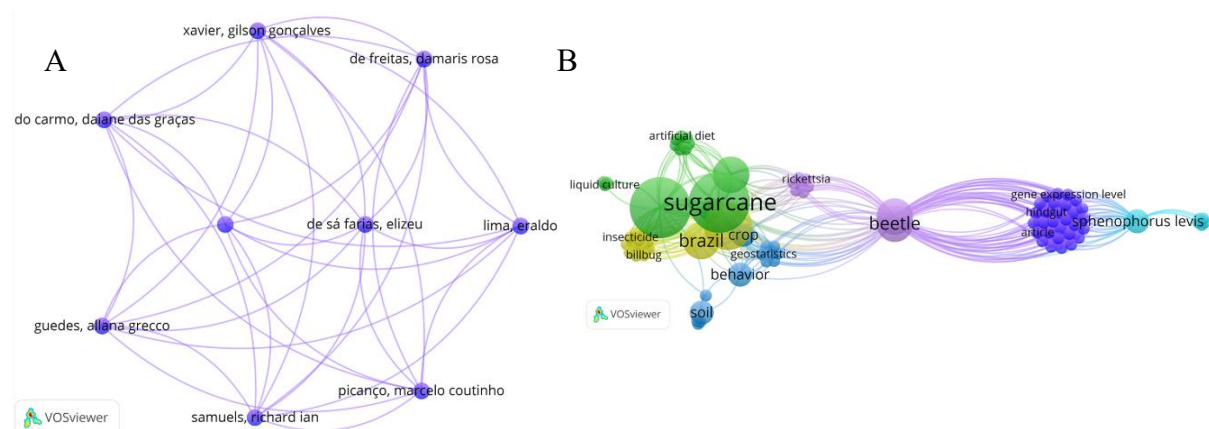


Figura 2. Recorrência de autores-coautores (A) e de palavras-chave em artigos científicos (B).
Fonte: Vosviewer com dados de pesquisa

Simultaneamente, foi realizada uma análise de coocorrência de palavras-chave com os seguintes critérios: (1) unidade de análise: todas as palavras-chave; (2) limiar mínimo: 1 ocorrência por termo. Antes da análise, o vocabulário foi padronizado, unificando termos semelhantes e eliminando duplicatas. O processo gerou uma rede de 90 termos-chave (Figura 2B), cujas inter-relações foram quantificadas por meio do cálculo da força total das ligações de coocorrência.

Utilizando o Research Rabbit

Posteriormente, a ferramenta Research Rabbit foi utilizada para complementar a análise bibliométrica (Figura 3). Essa aplicação permitiu o mapeamento das conexões entre as publicações e a quantificação do seu impacto científico, utilizando duas métricas principais: o número de citações do primeiro e do último artigo identificados na busca, e a contagem de citações individuais para cada publicação incluída na revisão. O uso combinado do VOSviewer e do Research Rabbit proporcionou uma visão abrangente das redes de conhecimento, abrangendo tanto a colaboração acadêmica (coautorias) quanto o impacto e a influência intelectual (padrões de citação). Essa abordagem metodológica mista possibilitou a identificação de tendências temporais, de núcleos temáticos prioritários e de lacunas na literatura existente sobre *S. levis*.

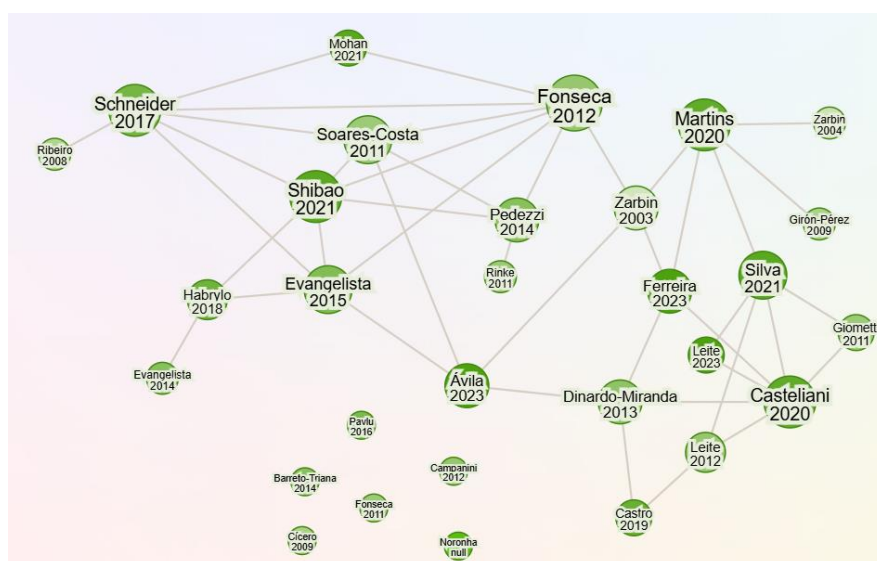


Figura 3. Análise bibliométrica da produção científica sobre *S. levis* com base em citações disponíveis online no Research Rabbit.

A ferramenta Research Rabbit apresenta uma limitação inerente, pois baseia sua análise exclusivamente em artigos científicos disponíveis em formato digital, estabelecendo conexões apenas entre documentos acessíveis online. Essa plataforma identifica sistematicamente: (1) o primeiro e o último artigo em cada cadeia de referência bibliográfica disponível digitalmente, (2) o número de citações recebidas e (3) trabalhos relacionados dos mesmos autores. Para superar essas limitações metodológicas, implementamos um protocolo de verificação cruzada com base em artigos de revisão sistemática indexados no Scopus, o que fortaleceu significativamente a robustez dos nossos dados estatísticos.

Essa abordagem integrada nos permitiu calcular o Índice de Obsolescência (IO) com maior precisão, seguindo a metodologia proposta por [Line e Sandison \(1974\)](#). O IO é expresso pela equação (1):

$$IO = F_{n/2} - f_1 \quad (1)$$

Onde: $F_{n/2}$ representa o ano em que metade do total de referências bibliográficas (n) do artigo em estudo é acumulada, e f_1 corresponde ao ano da primeira referência bibliográfica do mesmo artigo.

Esta abordagem metodológica combinada (Research Rabbit + verificação Scopus) mostrou-se particularmente eficaz para: (1) minimizar os vieses de disponibilidade digital, (2) aumentar a representatividade da amostra bibliográfica e (3) melhorar a confiabilidade dos indicadores bibliométricos derivados, especialmente em estudos de dinâmica temporal da literatura científica.

Análise de Regressão de Dados de Contagem

Seguindo os fundamentos metodológicos de [Cameron e Trivedi \(2013\)](#) para a análise de dados de contagem, um modelo de regressão binomial negativa (Equação 2) é especificado para a variável dependente $Articles_i$ (contagem de artigos no ano "i"), cuja distribuição é parametrizada por sua média μ_i e pelo parâmetro de dispersão θ :

$$Articles_i \sim \text{NegBin}(\mu_i, \theta), \quad \mu_i = \exp(\beta_0 + \beta_1 * \text{Tempos} + \beta_2 * \text{Fictícia}) \quad (2)$$

Onde: β_0 é o intercepto (contagem esperada quando Tempos = 0 e Fictícia = 0), β_1 é o efeito marginal do tempo (tendência anual) e β_2 é a mudança estrutural no intercepto associada a um ponto de quebra (Fictícia = 1 após a quebra; 0 caso contrário).

A equação 3 expressa a relação entre média e variância:

$$\text{Var}(Articles) = \mu_i + \theta \mu_i^2 \quad (3)$$

Este modelo generaliza a regressão de Poisson (que assume $\theta = 0$) e permite sobredispersão ($\theta > 0$). Para validar sua relevância, um teste de razão de verossimilhança (RV) foi implementado com:

Hipótese nula (H_0): $\theta = 0$ (a distribuição de Poisson é adequada).

Hipótese alternativa (H_a): $\theta > 0$ (a distribuição binomial negativa é necessária).

A estatística da razão de verossimilhança (RV) na Equação 4 segue uma distribuição χ^2 com 1 grau de liberdade ($\chi^2_{gl=1}$). Um resultado significativo (valor $p < 0,05$) rejeita H_0 , justificando o uso da distribuição binomial negativa.

$$RV = 2(\hat{\lambda}_{\text{NegBin}} - \hat{\lambda}_{\text{Poisson}}) \sim \chi^2_{gl=1} \quad (4)$$

Onde: $\hat{\lambda}_{\text{NegBin}}$ é o logaritmo da verossimilhança do modelo de contagem binomial negativa e I é o logaritmo da verossimilhança do modelo de contagem de Poisson.

As premissas do modelo foram verificadas por meio de testes estatísticos específicos. Para avaliar a independência dos resíduos, foi aplicado o teste de Durbin-Watson (DW), definido na Equação (5):

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^t (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^t e_i^2} \quad (5)$$

Onde: resíduo e_i do ano i e resíduo e_{i-1} do ano anterior ($i-1$).

As hipóteses testadas foram:

H_0 : Os resíduos não apresentam autocorrelação de primeira ordem (não seguem um processo AR(1)).

Ha: Os resíduos apresentam autocorrelação de primeira ordem (seguem um processo AR(1)).

O critério de decisão estabelece que H_0 é aceita quando o valor de DW está no intervalo $\left[DW_{k^*=2, n, \alpha=0.05}^+, 4 - DW_{k^*=2, n, \alpha=0.05}^- \right]$, onde $DW_{k^*=2, n, \alpha=0.05}^+$ e $DW_{k^*=2, n, \alpha=0.05}^-$ são os valores críticos superior e inferior com k^* parâmetros (excluindo o intercepto), n é o número de dados e $\alpha = 0,05$. Fora desse intervalo, H_0 é rejeitada.

A multicolinearidade foi avaliada por meio do Fator de Inflação da Variância (VIF). Valores acima de 10 indicam problemas significativos de multicolinearidade, enquanto valores inferiores a esse valor sugerem que esse fenômeno não afeta substancialmente as estimativas.

Para avaliar a qualidade geral do ajuste do modelo, foi utilizado o teste da razão de verossimilhança (RV), que compara a significância estatística do modelo completo usando a estatística χ^2 com 2 graus de liberdade; um valor $p < \alpha$ indica que o modelo é conjuntamente significativo. Nos testes de relevância individuais, cada coeficiente foi avaliado usando a estatística Z normal padrão, considerando significativos os parâmetros com valor $p < \alpha$ ou cujos intervalos de confiança com $1-\alpha$ excluem o zero.

Resultados

De acordo com os resultados apresentados na Figura 2A, a maior recorrência está associada a uma força total de oito vínculos, envolvendo nove autores/coautores, como em [Xavier et al. \(2024\)](#). Este trabalho, intitulado "Fatores determinantes e níveis de dano econômico de *S. levis* para controle químico e biológico em lavouras de cana-de-açúcar irrigadas e de sequeiro", aborda o Manejo de Pragas como tema principal. Os resultados revelam diferenças significativas entre o controle químico e o biológico, que dependem do nível de dano econômico causado às lavouras de cana-de-açúcar em João Pinheiro (Minas Gerais, Brasil).

De acordo com o estudo, a intervenção com controle químico se justifica quando o prejuízo econômico atinge 5,93% em lavouras de sequeiro e 4,85% em lavouras irrigadas. Por outro lado, o controle biológico é mais apropriado quando o prejuízo financeiro é de 4,15% em lavouras de sequeiro e 3,40% em lavouras irrigadas. Essa escolha depende, em grande parte, da intensidade do ataque do inseto, que afeta mais severamente as plantações mais antigas devido à sua maturação, criando um microclima propício ao desenvolvimento da praga. Da mesma forma, uma maior frequência de chuvas aumenta a umidade, facilitando o desenvolvimento dos estágios biológicos de *S. levis*.

Da mesma forma, a análise revela uma recorrência associada a uma força total de sete vínculos entre oito autores/coautores, conforme referenciado no estudo de [Peixoto et al. \(2024\)](#). Sua pesquisa, intitulada "Atratividade de armadilhas de isca para colhedores em um agroecossistema de cana-de-açúcar", está enquadrada no tema Ecologia Aplicada e foi desenvolvida em plantações de cana-de-açúcar em Jaboticabal (São Paulo, Brasil). O trabalho utiliza *S. levis* como armadilha para insetos, combinada com iscas específicas, para capturar aracnídeos (principalmente da espécie *Liogonyleptoides inermis*) como estratégia para promover um equilíbrio agroecológico sustentável.

O trabalho de [Ávila et al. \(2023\)](#), com força de recorrência de 4 links e a colaboração de 5 autores/coautores, intitulado "Insetos do solo associados ao cultivo da cana-de-açúcar em Mato Grosso do Sul, Brasil" (Ecologia Aplicada), documenta pela primeira vez a presença de *S. levis* na comunidade de insetos edáficos que afetam a produção de cana-de-açúcar, destacando sua abundância relativa e distribuição espacial. Por sua vez, [Shibao et al. \(2021\)](#), com cinco links de recorrência e quatro autores participantes, apresentam a pesquisa "Identificação e análise funcional de uma pseudo-cisteína protease do transcriptoma do intestino médio de *S. levis*"

(Enzimologia). Este estudo pioneiro, desenvolvido no Laboratório de Biologia Molecular da Universidade Federal de São Carlos (Brasil), caracteriza a protease SI-CathL e seu papel fundamental nos processos digestivos do inseto, fornecendo bases moleculares para o desenvolvimento de estratégias de controle biológico.

A análise da coocorrência de termos na Figura 2B revela que "Cana-de-açúcar" emerge como o termo mais frequente (5 ocorrências) e com maior centralidade na rede (57 conexões), seguido por "Besouro" e "Coleoptera" (3 ocorrências cada, 54 conexões). O termo "Animal" apresenta quatro ocorrências com 47 conexões, enquanto a denominação composta "Bicudo-da-cana" registra cinco ocorrências e 39 conexões. A referência geográfica "Brasil" aparece três vezes com 36 conexões, e a espécie "*Sphenophorus levis*" é documentada duas vezes com 35 conexões. Outros termos, como "Inseto" (3 ocorrências, 29 conexões), "Cultura" (2 ocorrências, 21 conexões) e "Comportamento" (2 ocorrências, 15 conexões), têm menor relevância na rede semântica.

Esse padrão terminológico indica que a literatura analisada se concentra principalmente em: (1) o impacto de besouros, particularmente *S. levis*, na cultura da cana-de-açúcar no Brasil, e (2) os padrões de comportamento fitófago dessas pragas. Cabe ressaltar que, embora *S. levis* apareça como espécie focal, os dados sugerem a participação complementar de outros artrópodes-praga, como o percevejo-da-cana (*Tomaspis* spp.), o que destaca a complexidade das comunidades de artrópodes que afetam essa cultura. A menor frequência de termos relacionados ao comportamento sugere que essa linha de pesquisa representa uma área emergente que merece maior atenção em estudos futuros.

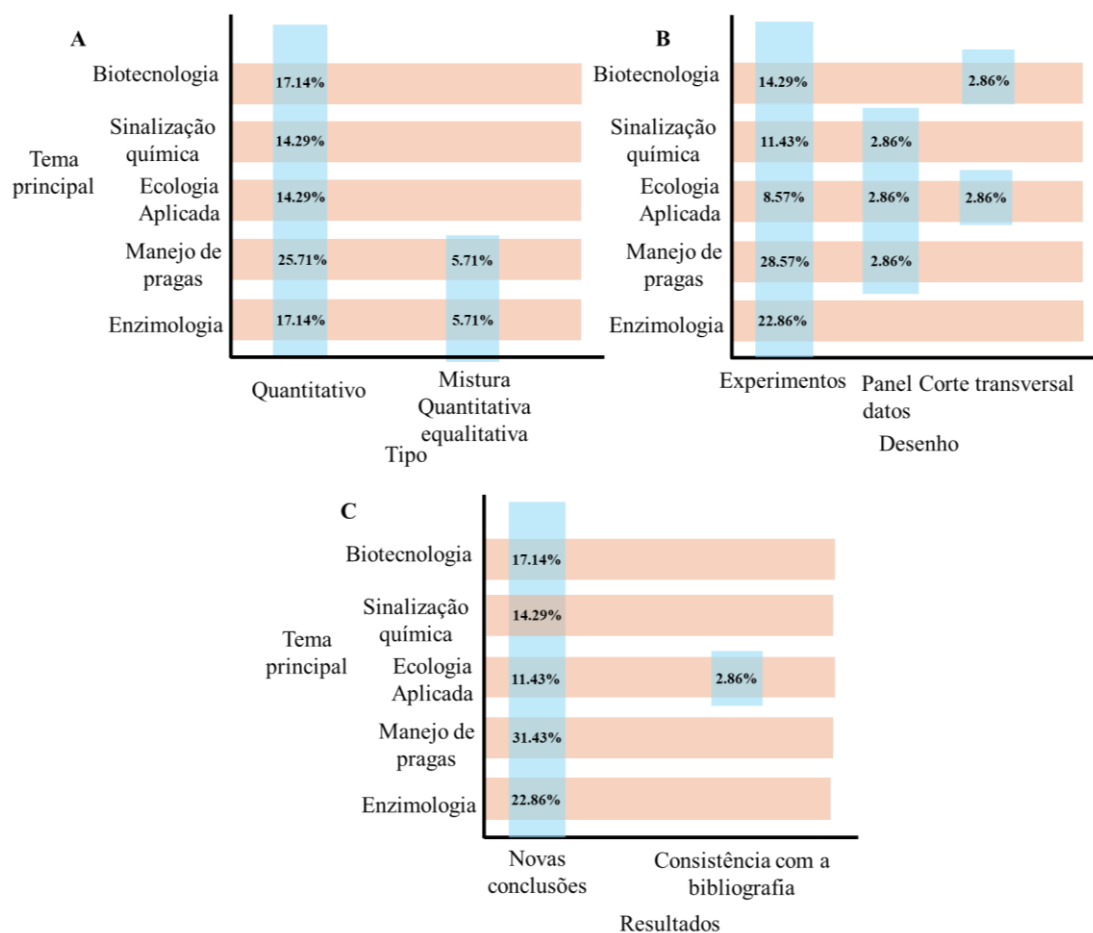


Figura 4. Relação sistemática entre os principais tópicos: (A) tipos de estudo, (B) desenhos metodológicos e (C) resultados relatados na literatura científica sobre *S. levis*.

A análise integrada da Tabela 1 e da Figura 4A revela padrões metodológicos importantes na pesquisa sobre *S. levis*. Os dados mostram que 88,58% dos estudos empregaram abordagens quantitativas, enquanto 11,42% combinaram métodos quantitativos e qualitativos. Dentro das análises quantitativas, 25,71% focaram no Manejo Integrado de Pragas (MIP), avaliando estratégias de controle químico, biológico e cultural. Enquanto isso, 17,14% abordaram a Biotecnologia, incluindo o desenvolvimento de plantas transgênicas e aplicações industriais de inseticidas. Além disso, 17,14% focaram na Enzimologia, estudando processos digestivos para inovar métodos de controle. Os temas de Sinalização Química e Ecologia Aplicada representaram aproximadamente 5,71% cada, analisando interações planta-inseto e sustentabilidade ambiental, respectivamente, em relação aos delineamentos metodológicos (Figura 4B). Houve predominância de estudos experimentais (85,72%) em todos os temas, particularmente em Manejo de Pragas e Enzimologia, seguidos por dados em painel (8,58%) aplicados em Sinalização Química, Ecologia Aplicada e Manejo de Pragas, e estudos transversais (5,72%) em Biotecnologia e Ecologia Aplicada. Os resultados (Figura 4C) mostraram que 97,14% dos artigos geraram Novas Conclusões, com maior representatividade em Manejo de Pragas (31,43%), seguido por Enzimologia (22,86%), Biotecnologia (17,14%), Sinalização Química (14,29%) e Ecologia Aplicada (11,43%). Essa distribuição enfatiza soluções aplicadas ao controle de pragas, complementadas por pesquisas fundamentais sobre a biologia do inseto.

A análise da distribuição temática da literatura científica (Tabela 2) revela que o Manejo de Pragas concentra a maior porcentagem de publicações (14,51%), seguido por Ecologia Aplicada (4,40%), Biotecnologia (2,64%) e Sinalização Química (1,10%). A ausência de produção recente em Enzimologia é notável, o que sugere um declínio no interesse de pesquisa nessa área. Ao examinar os padrões de citação, observa-se uma média de 35 ± 13 referências por artigo (mediana = 36), com uma distribuição aproximadamente simétrica, mas com variabilidade acentuada (variação: 11-65 referências). Essa dispersão reflete diferenças substanciais nas práticas de citação entre as diferentes linhas de pesquisa. Os artigos sobre Ecologia Aplicada apresentam um perfil de citação mais atualizado em comparação com outros tópicos, enquanto em Manejo de Pragas observa-se um equilíbrio entre referências antigas e recentes.

Table 2. Distribuição temporal e métricas de impacto da literatura científica sobre *S. levis* como praga na cana-de-açúcar.

Tema principal	Autor	Referências bibliográficas		Citações		Obras Semelhante
		Intervalo	Quantidade	Intervalo	Quantidade	
A – Enzimologia	A1 - Evangelista <i>et al.</i> (2014)	1968  2012	27	2017 2018	1	10
	A2 - Evangelista <i>et al.</i> (2015)	1987  2014	41	2016  2025	16	8
	A3 - Fonseca <i>et al.</i> (2011)	1967  2008	26	2014  2021	6	17
	A4 - Fonseca <i>et al.</i> (2012)	1970  2011	65	2014  2023	19	12
	A5 - Mohan <i>et al.</i> (2021)	1980  2020	39	2022  2025	10	19
	A6 - Peduzzi <i>et al.</i> (2014)	1890  2013	30	2015  2024	30	13
	A7 - Rinke <i>et al.</i> (2011)	1975  2010	38	2012  2024	25	15
	A8 - Shibao <i>et al.</i> (2021)	1970  2019	56	2021  2023	1	11
	B1 - Campanini <i>et al.</i> (2012)	1986  2012	29	2012  2025	4	8
	B2 - Cicero <i>et al.</i> (2009)	1986  2007	23	2014  2025	4	6
B – Manejo de Pragas	B3 - De Castro <i>et al.</i> (2019)	1955  2018	63	2019  2025	16	15
	B4 - Ferreira <i>et al.</i> (2024)	1947  2023	40		0	-
	B5 - Giometti <i>et al.</i> (2011)	1927  2010	27	2011  2024	15	12
	B6 - Leite <i>et al.</i> (2023)	1927  2023	38	2024 2025	4	5
	B7 - Pavlu and Molin (2016)	1987  2012	11	2017  2025	11	5
	B8 - Silva <i>et al.</i> (2021)	1978  2020	48	2022  2024	7	21
	B9 - Soares-Costa <i>et al.</i> (2011)	1948  2009	36	2011  2024	21	14
	B10 - Urach Ferreira & Ferreira (2023)	1985  2022	39	2023 2024	2	2
	B11 - Xavier <i>et al.</i> (2024)	1985  2023	48	2023 2024	1	9
	C1 - Ávila <i>et al.</i> (2023)	1981  2002	29		0	4
C – Ecologia Aplicada	C2 - Leite <i>et al.</i> (2012)	1984  2009	23	2015  2024	18	12
	C3 - Martins <i>et al.</i> (2020)	1978  2017	26	2021  2024	6	12
	C4 - Peixoto <i>et al.</i> (2024)	1982  2022	48		0	8
	C5 - Rosa <i>et al.</i> (2024)	1987  2022	35		0	3
D – Sinalização Química	D1 - Barreto-Triana <i>et al.</i> (2014)	1963  2013	38	2020  2023	3	8
	D2 - Castaliani <i>et al.</i> (2020)	1927  2018	33	2021  2025	12	22
	D3 - Girón-Pérez <i>et al.</i> (2009)	1983  2007	21	2014  2024	9	6

E- Biotecnologia	D4 - Zarbin <i>et al.</i> (2003)	1963  2002	22	2007  2024	42	12
	D5 - Zarbin <i>et al.</i> (2004)	1968  2003	15	2007  2021	10	10
	E1 - Dinardo-Miranda and Fracasso (2013)	1973  2011	25	2014  2025	53	4
	E2 - Faria <i>et al.</i> (2024)	1977  2024	38		0	-
	E3 - Habrylo <i>et al.</i> (2018)	1959  2017	59	2018  2025	21	12
	E4 - Noronha <i>et al.</i> (2019)	2011  2016	15	2021  2024	2	12
	E5 - Ribeiro <i>et al.</i> (2008)	1962  2007	46	2010  2025	21	20
	E6 - Schneider <i>et al.</i> (2017)	1978  2016	45	2017  2025	37	14

Fonte: Elaborado pelos autores utilizando uma combinação de Research Rabbit e Scopus.

O impacto científico, medido pelo número de citações recebidas, apresenta uma média de 12 ± 13 por artigo (mediana = 9), indicando uma distribuição assimétrica. Os trabalhos mais influentes incluem contribuições importantes em Enzimologia (Fonseca *et al.*, 2012; Rinke *et al.*, 2011), Manejo de Pragas (Soares-Costa *et al.*, 2011), Sinalização Química (Zarbin *et al.*, 2003) e Biotecnologia (Dinardo-Miranda & Fracasso, 2013). Particularmente relevante é o caso de Dinardo-Miranda & Fracasso (2013), que obteve 53 citações, tornando-se a contribuição mais citada até o momento. Ao mesmo tempo, identificam-se pesquisas emergentes com baixo número de citações, mas com potencial de crescimento, como os trabalhos recentes de Urach Ferreira & Ferreira (2023) e Xavier *et al.* (2024) em Manejo de Pragas.

Em termos de padrões de colaboração, a análise de trabalhos similares revela uma média de 11 ± 5 por autor (mediana = 12). Os pesquisadores mais produtivos incluem Mohan *et al.* (2021) em Enzimologia, Silva *et al.* (2021) em Manejo de Pragas e Castelviani *et al.* (2020) em Sinalização Química. No entanto, persistem disparidades significativas na colaboração científica, com alguns autores apresentando pouca produção conjunta (≤ 5 artigos similares). A distribuição temática revela lacunas substanciais de conhecimento, particularmente em Ecologia Aplicada, Sinalização Química e Biotecnologia, que, em conjunto, representam menos de 36% da produção científica analisada. Esses achados sugerem a necessidade de fortalecer a pesquisa nessas áreas menos exploradas, especialmente por meio de estudos que integrem abordagens multidisciplinares para melhor compreender o problema de *S. levis* em lavouras de cana-de-açúcar.

Os resultados do modelo de regressão de Poisson (Tabela 3) revelam padrões significativos na produção científica sobre *S. levis* entre 2003 e 2024. O intercepto apresenta um valor significativo ($\beta_0 = 1,2688$, IC_{95%} [0,5530, 1,9846], valor $p = 0,0005$), indicando uma alta taxa de publicações durante o subperíodo inicial (2003-2014). A variável "Tempos" apresenta um coeficiente positivo significativo ($\beta_1 = 0,1794$, IC_{95%} [0,0638, 0,2950], valor $p = 0,0024$), sugerindo um crescimento anual sustentado de 17,94% ao longo da série temporal. No entanto, a variável Fictício (2015-2024 = 1 e 2004-2014 = 0) mostra um efeito negativo significativo ($\beta_2 = -1,5633$, IC_{95%} [-2,9390, -0,1876], valor $p = 0,0259$), revelando uma diminuição substancial na produtividade científica na última década.

Table 3. Modelagem de Poisson da produtividade científica em *S. levis* (2003-2024)

Variável independente	β_{MV}	SE (β_{MV})	Estatística Z	Valor de P	Intervalo de confiança de 95% [IC(β_{MV}) _{95%}]	
					Inferior: IC(β_{MV}) ^{-95%}	Superior: IC(β_{MV}) ^{+95%}
Interceptar	1,2688	0,3652	3,4743	0,0005***	0,5530	1,9846
Tempos	0,1794	0,0590	3,0407	0,0024***	0,0638	0,2950
Fictício (2015-2024 = 1 e 2004-2014 = 0)	-1,5633	0,7019	-2,2272	0,0259**	-2,9390	-0,1876
Dispersion (θ)	0,0000	0,0002			-0,0004	0,0004
Teste de aderência						
Estatística RV [Qui-quadrado (gl = 1)]	0,4549		Valor de P	0,5000		
Estatística LR [Qui-quadrado (gl = 2)]	11,2600		Valor de P	0,0036***	Pseudo R ²	0,1535
Estatística de Durbin-Watson (DW)	1,8788				Inferior: DW (k*=2, n= 22, $\alpha=0,05$)	1,5410
					Superior: DW (k*=2, n= 22, $\alpha=0,05$)	1,1470
VIF: Tempos e Fictício	1,28					

Diversos testes estatísticos confirmam a qualidade do ajuste do modelo. O teste da razão de verossimilhança (LR = 11,2600, valor p = 0,0036) rejeita a hipótese nula, demonstrando a significância geral do modelo. O pseudo R² de 15,35% indica que as variáveis explicam uma proporção considerável da variabilidade. A estatística de Durbin-Watson (DW = 1,8788) está dentro do intervalo crítico [1,5410, 2,8530], confirmando a ausência de autocorrelação serial. Os baixos valores de VIF (1,28) descartam problemas de multicolinearidade, e o teste de dispersão ($\theta = 0,0000$, IC_{95%} [-0,0004, 0,0004]) valida o uso do modelo de Poisson em detrimento de alternativas como a binomial negativa.

A equação estimada:

$$\mu_i = \exp(1.27 + 0.18 * \text{Tempos} - 1.56 * \text{Fictícia})$$

Isso permite quantificar que a produção científica acumulada atingiu 255,66% durante o período de 2003 a 2014, impulsionada pela necessidade de lidar com os danos causados pela praga. No entanto, essa taxa diminuiu significativamente (79,06%) no subperíodo de 2015 a 2024, possivelmente devido à saturação das linhas de pesquisa tradicionais, mudanças nas prioridades de financiamento, concentração geográfica do problema em quatro estados brasileiros ou à diminuição da percepção de urgência após os avanços iniciais.

Apesar do recente impacto negativo, a taxa de crescimento anual persistente (19,65%) sugere que o problema continua relevante. Os resultados destacam a necessidade de: diversificar os estudos geograficamente, integrar tecnologias emergentes e desenvolver abordagens interdisciplinares. Para as agências de fomento à pesquisa, esses achados justificam a implementação de programas específicos que revitalizem a pesquisa, com ênfase em regiões menos exploradas e nos efeitos das mudanças climáticas sobre a dinâmica populacional dessa praga-chave para a indústria açucareira.

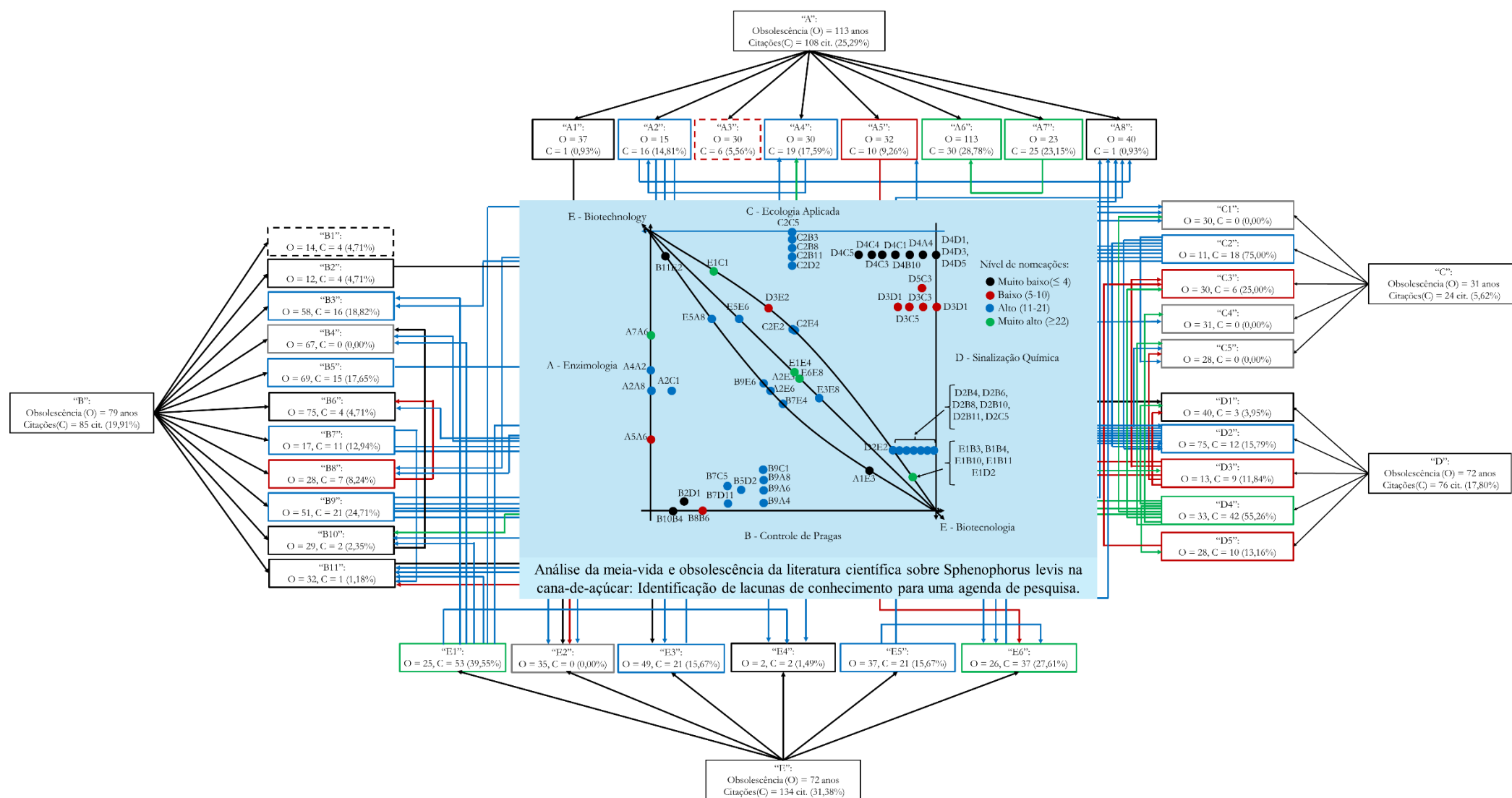
A análise da obsolescência e do impacto bibliométrico é ilustrada na Figura 5, onde os tópicos de Ecologia Aplicada (C) e Biotecnologia (E) apresentam as menores taxas de obsolescência, com meias-vidas de 31 e 45 anos, respectivamente. Isso sugere uma renovação mais rápida de seus fundamentos teóricos. Em contraste, Enzimologia (A) apresenta a maior meia-vida (113 anos), indicando uma persistência excepcional de sua literatura de base. Tópicos como Sinalização Química (D) e Manejo de Pragas (B) ocupam uma posição intermediária, com 72 e 79 anos, respectivamente (Figura 5).

Em termos de artigos individuais, o trabalho de [Pedezzi et al. \(2014\)](#) (A6) destaca-se como o mais antigo em Enzimologia; sua exclusão reduz a meia-vida do tema para 36 anos. Por outro lado, pesquisas como [Evangelista et al. \(2015\)](#) (A2; 15 anos) e [Rinke et al. \(2011\)](#) (A7; 23 anos) em Enzimologia, [Campanini et al. \(2012\)](#) (B1; 14 anos) em Manejo de Pragas, [Leite et al. \(2012\)](#) (C2; 11 anos) em Ecologia Aplicada, [Girón-Pérez et al. \(2009\)](#) (D3; 13 anos) em Sinalização Química e [Noronha et al. \(2019\)](#) (E4; 2 anos) em Biotecnologia representam os casos de renovação teórica mais acelerada (Figura 5).

Em relação aos padrões de citação, os tópicos Enzimologia (A) e Biotecnologia (E) concentram o maior impacto bibliográfico, representando 25,29% e 31,38% do total de citações, respectivamente. Esse fenômeno se explica por contribuições importantes, incluindo [Evangelista et al. \(2015\)](#) (A2), [Fonseca et al. \(2012\)](#) (A4), [Dinardo-Miranda e Fracasso \(2013\)](#) (E1) e [Schneider et al. \(2017\)](#) (E6). Em contraste, Ecologia Aplicada (C) apresenta o menor impacto (5,62% do total de citações). Em comparação, Manejo de Pragas (B) (19,91%) e Sinalização Química (D) (17,80%) ocupam posições intermediárias, apoiadas por trabalhos como [De Castro et al. \(2019\)](#) (B3) e [Zarbin et al. \(2003\)](#) (D4) (Figura 5).

A análise das redes de citação revela padrões distintos. Enquanto a área de Sinalização Química (D) recebe 90% de suas citações de outros tópicos (principalmente Biotecnologia), a área de Manejo de Pragas (B) apresenta maior endogamia temática (21% das citações internas). Notavelmente, 86,65% do total de citações se origina de literatura não diretamente relacionada a esta revisão sistemática, indicando a transversalidade da pesquisa sobre *S. levis* (Figura 3 e Figura 5). Os artigos avaliados individualmente podem ser consultados no material suplementar do artigo.

As implicações para a pesquisa são uma síntese bibliométrica que destaca as principais abordagens para o controle de *S. levis*, incluindo estudos enzimológicos, estratégias de manejo integrado e aplicações biotecnológicas. No entanto, lacunas críticas são identificadas, particularmente no desenvolvimento de variedades transgênicas de cana-de-açúcar e na valorização da praga como recurso para a indústria alimentícia. Essas áreas representam oportunidades para pesquisas futuras.



Discussão

Enzimologia do inseto *S. levis*

Estudos enzimológicos indicam que as enzimas digestivas de *S. levis* desempenham um papel crucial em seu estabelecimento como praga da cana-de-açúcar, apoiando estratégias de controle baseadas em sua inibição. A identificação e caracterização de enzimas-chave, como a SI-CathL (uma protease de cisteína essencial na digestão larval), destacam sua relevância fisiológica (Fonseca *et al.*, 2012; Shibao *et al.*, 2021). Essa enzima, localizada no intestino médio, interage com inibidores naturais como a cistatina CaneCPI-4, cujo bloqueio compromete a sobrevivência do inseto. Esses achados apoiam o desenvolvimento de variedades transgênicas de cana-de-açúcar que expressam cistatinas, uma estratégia inovadora em biotecnologia agrícola.

Em relação à origem e diversidade enzimática, Evangelista *et al.* (2015) demonstraram que as pectinases SI de *S. levis* derivam da transferência horizontal de genes de origem bacteriana e fúngica. Essas enzimas facilitam a degradação das paredes celulares vegetais, tornando-as alvos prioritários para o controle. A inibição seletiva de pectinases, combinada com interferência de RNA (RNAi), pode suprimir a capacidade nutricional do inseto sem afetar organismos não-alvo (Mohan *et al.*, 2021).

Além das cistatinas, estudos como os de Fonseca *et al.* (2011) e Pedezzi *et al.* (2014) propõem o uso de inibidores específicos da leviserpina e o planejamento racional de inibidores enzimáticos utilizando ferramentas biotecnológicas. Essas abordagens complementares enfatizam a versatilidade das estratégias de engenharia genética disponíveis, compostos naturais e interferência de RNA.

A inibição sustentada de pectinases e SI-CathL reduz diretamente as populações de *S. levis* e diminui a dependência de inseticidas químicos, promovendo práticas agrícolas sustentáveis (Evangelista *et al.*, 2014; Shibao *et al.*, 2021). No entanto, é crucial avaliar os efeitos ecológicos não intencionais, como resistência adaptativa ou impactos nos simbiontes microbianos dos bicudos.

A heterogeneidade na expressão enzimática foi observada entre as populações de *S. levis*, o que pode afetar a eficácia dos inibidores. Pesquisas futuras devem validar estratégias como cistatinas e RNAi em condições de campo, explorar combinações de inibidores, incluindo cistatinas e RNAi, para mitigar os riscos de resistência e investigar os mecanismos de interação enzima-inibidor e sua estabilidade ecológica.

Manejo da praga *S. levis* no cultivo da cana-de-açúcar

A implementação de estratégias integradas é crucial para mitigar o impacto econômico de *S. levis* nas culturas de cana-de-açúcar. Estudos recentes têm demonstrado que o controle biológico, utilizando cepas específicas de *B. thuringiensis* (cepas 89, 97, 101, 629 e 923), apresenta alta eficácia contra o inseto-praga *S. levis* (Cícero *et al.*, 2009; Campanini *et al.*, 2012). Além disso, a aplicação do nematoide entomopatogênico *S. rarum*, utilizando métodos inovadores como esponjas de distribuição, tem apresentado resultados promissores devido à sua especificidade e baixo impacto ambiental (Silva *et al.*, 2021; Leite *et al.*, 2023). Contudo, a eficácia desses métodos biológicos pode ser afetada por condições ambientais adversas, particularmente em solos compactados ou durante períodos de seca.

No campo do controle químico, pesquisas recentes avaliaram a eficácia de inseticidas como lambda-cialotrina e tiametoxam, relatando taxas de mortalidade de 75% em adultos de *S. levis* (Ferreira *et al.*, 2024). No entanto, como apontam Urach Ferreira e Ferreira (2023), o uso inadequado desses produtos pode gerar resistência em populações de insetos, além de impactos ambientais negativos. Esses autores propõem que a aplicação noturna, coincidindo com o

período de maior atividade dos insetos, poderia otimizar a eficácia do controle químico, reduzindo a quantidade de inseticida utilizada.

Estratégias culturais têm se mostrado particularmente eficazes como medidas preventivas. **De Castro et al. (2019)** documentaram como a remoção da palha pode eliminar eficazmente os locais de oviposição e desenvolvimento larval. Estudos mais recentes (**Xavier et al., 2024**) constataram que os ataques são mais severos durante períodos chuvosos e em plantas maduras, sugerindo a necessidade de ajustar os calendários de plantio e colheita de acordo. Uma inovação promissora nessa área combina a remoção da palha com a introdução de nematoides em resíduos orgânicos, criando assim um sistema de controle integrado que reduz a dependência de insumos químicos.

Ao comparar essas estratégias, fica evidente que cada uma apresenta vantagens e limitações específicas. Embora o controle biológico ofereça sustentabilidade a longo prazo, sua implementação pode ser limitada por fatores ambientais. O controle químico, apesar de sua ação rápida, acarreta riscos ambientais e de resistência. As estratégias culturais, por outro lado, são econômicas, mas precisam ser complementadas com diferentes métodos. Essa complementaridade sugere que o manejo integrado de pragas, que combina estrategicamente essas abordagens, representa a alternativa mais viável para o controle sustentável de *S. levis*.

Como perspectivas futuras, é necessário validar em condições de campo os projetos integrados que combinam essas três abordagens. Além disso, pesquisas como a de **Soares-Costa et al. (2011)** sugerem que ferramentas biotecnológicas emergentes, particularmente a interferência de RNA (RNAi), podem complementar efetivamente essas estratégias tradicionais. A integração do conhecimento convencional com tecnologias inovadoras representa a maneira mais promissora de desenvolver sistemas de manejo sustentáveis e eficazes contra essa praga-chave da cana-de-açúcar.

Interações ecológicas de *S. levis* na cana-de-açúcar

A revisão sistemática da literatura demonstra a complexa interação entre *S. levis* e os agroecossistemas da cana-de-açúcar, onde diversos fatores influenciam a dinâmica populacional. Estudos recentes têm demonstrado que os resíduos da cultura servem como microhabitats cruciais para *S. levis*, facilitando sua sobrevivência e reinfestação (**Rosa et al., 2024**). Esses achados ressaltam a importância da implementação de protocolos rigorosos de limpeza pós-colheita, incluindo a remoção de colmos residuais e a desinfecção das áreas de transferência, para interromper efetivamente o ciclo do inseto. Além disso, pesquisas como a de **Ávila et al. (2023)** destacam como a diversidade do solo modula as populações de pragas, observando que agroecossistemas com maior riqueza de predadores naturais apresentam menor incidência de *S. levis*, o que reforça a importância da implementação de cobertura vegetal que favoreça artrópodes benéficos e do monitoramento sistemático da biodiversidade do solo como indicador precoce de desequilíbrios.

Em termos de estratégias de controle biológico, estudos como o de **Leite et al. (2012)** demonstraram que a combinação de nematoides entomopatogênicos (*Steinernema spp.*) com inseticidas de baixo impacto pode reduzir significativamente as populações de *S. levis* sem afetar a produtividade da cultura. No entanto, a eficácia desse método é condicionada por parâmetros específicos do solo e do clima (temperatura, umidade do solo), exigindo aplicações sincronizadas com períodos chuvosos ou por meio de irrigação complementar. Avanços recentes no uso de semioquímicos (**Martins et al., 2020; Peixoto et al., 2024**) sugerem que a combinação de feromônios específicos com iscas biológicas pode resultar em alta especificidade e captura em massa. Contudo, ainda existem desafios no desenvolvimento de atrativos eficazes para os estágios larvais.

Para uma gestão abrangente e sustentável, propõe-se um protocolo baseado em três componentes principais: prevenção através da limpeza mecânica pós-colheita (Rosa *et al.*, 2024) e enriquecimento da biodiversidade do solo (Ávila *et al.*, 2023); intervenção direta com combinações de nematoides e inseticidas seletivos (Leite *et al.*, 2012), complementada com armadilhas de feromônios (Peixoto *et al.*, 2024); e monitoramento adaptativo através de sistemas de alerta precoce. As principais limitações incluem a variabilidade geográfica nas interações inseto-planta entre regiões e a falta de modelos preditivos abrangentes. Como perspectivas futuras, recomenda-se investigar o papel dos microbiomas da rizosfera na resistência das plantas, desenvolver sistemas de gestão adaptativos às mudanças climáticas, otimizar formulações semioquímicas para estágios larvais e estabelecer limiares regionais de danos econômicos. Esta abordagem multidimensional, apoiada por evidências científicas recentes, representa um avanço significativo rumo à gestão sustentável de *S. levis*, combinando eficácia operacional com preservação ambiental.

Identificação e utilização de semioquímicos para interferir na agregação e reprodução de *S. levis*

A pesquisa sobre a identificação de semioquímicos em *S. levis* abriu novas possibilidades para o desenvolvimento de estratégias de manejo que interrompam sua comunicação química. Estudos recentes demonstraram o potencial de feromônios e cairomônios como ferramentas ecológicas para o controle dessa praga em lavouras de cana-de-açúcar. Pesquisas pioneiras de Zarbin *et al.* (2003, 2004) identificaram o (S)-2-metil-4-octanol como um feromônio de agregação produzido por machos de *S. levis*. Esse composto, particularmente em sua forma enantiomérica, desempenha um papel crucial na agregação de indivíduos, na estimulação da cópula (Barreto-Triana *et al.*, 2014) e representa a base para o desenvolvimento de estratégias de controle biológico. Na prática, esse composto pode ser utilizado em armadilhas de grande escala ou em sistemas de "atração e eliminação", reduzindo a dependência de inseticidas convencionais.

Diversos fatores influenciam a eficácia dos atrativos químicos. Girón-Pérez *et al.* (2009) demonstraram que a resposta aos semioquímicos varia de acordo com fatores temporais, com maior receptividade observada entre 21 e 35 dias da fase adulta (Barreto-Triana *et al.*, 2014). Além disso, a resposta aos semioquímicos é influenciada pelo tipo de substrato, que varia em função das condições da cultura e dos resíduos vegetais. Esses achados sugerem que as estratégias de manejo devem considerar tanto o momento ideal de aplicação, coincidindo com o período de máxima atividade reprodutiva, quanto a disposição adequada dos dispensadores no campo.

A integração de semioquímicos com agentes de biocontrole apresenta resultados promissores. Castelianni *et al.* (2020) demonstraram que o nematoide *S. carpocapsae* pode ser utilizado eficazmente no período pós-colheita, que coincide com a dispersão de adultos de *S. levis*. Os feromônios descritos podem ser usados para atrair pragas em áreas específicas antes da aplicação do nematoide, melhorando a eficácia dos agentes biológicos ao aumentar o contato praga-patógeno. Essa abordagem integrada oferece vantagens sinérgicas, reduzindo o número necessário de nematoides e aumentando a precisão do controle.

As perspectivas para o manejo sustentável incluem: (1) captura em massa com feromônios sintéticos, (2) controle reprodutivo por meio de confusão sexual e (3) sistemas de "atração e eliminação" que combinam semioquímicos com inseticidas seletivos ou patógenos. No entanto, ainda existem limitações, como a necessidade de otimizar as formulações para maior persistência no campo, validar a eficácia econômica em larga escala e prevenir o desenvolvimento de resistência comportamental. Pesquisas futuras devem se concentrar na identificação de cairomônios específicos para aumentar a atração, no desenvolvimento de

dispensadores de liberação controlada adaptados a ambientes tropicais, na avaliação das interações com outros componentes do agroecossistema e na análise dos impactos a longo prazo na dinâmica populacional de *S. levis*. Esses avanços representam oportunidades significativas para o desenvolvimento de estratégias de controle mais precisas e sustentáveis.

Aplicação de abordagens biotecnológicas avançadas para o controle de *S. levis* na cana-de-açúcar

Pesquisas recentes em biotecnologia oferecem soluções inovadoras para o manejo de *S. levis*, superando as limitações dos métodos convencionais. Estudos sistemáticos revelam o potencial de bioinsumos, engenharia genética e tecnologias de precisão para o desenvolvimento de estratégias específicas contra essa praga. No campo dos bioinsumos, pesquisas sobre pectinases ([Habrylo et al., 2018](#)) demonstraram sua utilidade no desenvolvimento de inibidores que bloqueiam a digestão das paredes celulares, bem como na produção de enzimas pectinolíticas com atividade aprimorada. Uma abordagem inovadora é o uso de técnicas de RNAi para silenciar genes associados a essas enzimas, uma área ainda não explorada no sistema praga-cultura e que representa uma linha de pesquisa promissora.

A engenharia genética alcançou avanços significativos por meio do desenvolvimento de variedades transgênicas de cana-de-açúcar que expressam inibidores de protease, como a canecistatina (CaneCPI-1) ([Schneider et al., 2017](#); [Ribeiro et al., 2008](#)). Esses inibidores têm como alvo específico as proteases de cisteína digestivas de *S. levis*, reduzindo sua capacidade de alimentação, minimizando os impactos sobre organismos não-alvo e proporcionando proteção contínua. No entanto, ainda existem desafios, como a otimização dos níveis de expressão nos tecidos do caule e a avaliação dos efeitos a longo prazo na microbiota do solo ([Dinardo-Miranda & Fracasso, 2013](#)), aspectos críticos para garantir a sustentabilidade dessa tecnologia.

Tecnologias de precisão, particularmente os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) ([Noronha et al., 2019](#)), permitem o mapeamento de campos infestados com alta resolução espacial, facilitando a aplicação direcionada de bioinsumos, como nematoides entomopatogênicos, em áreas críticas. Essa abordagem reduz custos e melhora a eficiência do controle. A integração do GNSS com modelos preditivos baseados na biologia de *S. levis* ([Faria et al., 2024](#)) poderia otimizar ainda mais o momento das intervenções, maximizando sua eficácia.

A combinação com práticas agrícolas sustentáveis representa outro componente essencial. As estratégias de colheita afetam diretamente a permanência de *S. levis*, perturbando seus habitats larvais em resíduos de culturas e modificando as interações solo-praga-microbioma ([Dinardo-Miranda & Fracasso, 2013](#)). Recomenda-se associar variedades transgênicas a um manejo pós-colheita que elimine os resíduos de palha (que servem de refúgio para larvas e adultos), preservando os inimigos naturais nativos, criando assim um sistema de manejo integrado mais robusto.

Apesar desses avanços, limitações importantes persistem, como as restrições regulatórias às culturas geneticamente modificadas em diversos países e a necessidade de ampliar a produção industrial de bioinsumos, incluindo o CaneCPI-1. Pesquisas futuras devem priorizar: (1) a avaliação do fluxo gênico em cana-de-açúcar transgênica, (2) o desenvolvimento de sistemas de liberação controlada para RNAi e (3) a quantificação dos impactos econômicos comparativos em relação aos métodos tradicionais. Essas linhas de pesquisa são cruciais para alcançar a ampla adoção dessas tecnologias inovadoras no manejo de *S. levis*.

Conclusões

Uma revisão sistemática da literatura sobre *S. levis* revela que os estudos sobre esse inseto se concentram principalmente em cinco áreas principais: Enzimologia, Manejo de Pragas, Ecologia Aplicada, Sinalização Química e Biotecnologia. Nesse contexto, as enzimas digestivas do bicudo podem desempenhar um papel funcional crucial no controle eficaz e sustentável de *S. levis*. Para isso, é necessário integrar abordagens, técnicas e metodologias que vão desde inibidores naturais até ferramentas de biologia molecular, permitindo a manipulação de proteínas, RNA e DNA. Essa linha de pesquisa pode lançar as bases para o desenvolvimento de estratégias de melhoramento genético em plantações de cana-de-açúcar.

Em relação ao manejo de pragas, os estudos analisados focam no controle de *S. levis* em lavouras de cana-de-açúcar no Brasil, avaliando o uso de agrotóxicos, controle biológico e práticas culturais. Os resultados mostram que nenhuma estratégia aplicada isoladamente é suficiente para alcançar o controle sustentável do inseto. No entanto, a combinação de métodos, como inseticidas, nematoides entomopatogênicos, bactérias Bt e práticas culturais, aumenta significativamente sua eficácia. Para maximizar o controle e minimizar os impactos ambientais, recomenda-se adaptar os protocolos às condições locais, levando em consideração os fatores climáticos e a idade da cultura. Sugere-se também priorizar o controle biológico e cultural, reservando o controle químico para surtos severos. Além disso, é crucial desenvolver políticas que promovam o manejo integrado de pragas em sistemas de produção agrícola.

No campo da ecologia aplicada, as interações ecológicas de *S. levis* em agroecossistemas de cana-de-açúcar são analisadas, propondo três estratégias para o manejo sustentável do ponto de vista econômico e ambiental: (1) reduzir os locais de proliferação por meio da modificação do habitat, (2) aproveitar as interações bióticas, como o controle biológico e o uso de semioquímicos, e (3) implementar sistemas de monitoramento baseados na biodiversidade.

Os avanços no estudo da sinalização química de *S. levis*, particularmente o papel do (S)-2-metil-4-octanol, representam uma contribuição relevante para o seu manejo sustentável. A integração desses semioquímicos com outras formas de controle, como o biológico ou o cultural, poderia aumentar a especificidade das estratégias, reduzir a dependência de inseticidas químicos e incorporar práticas alinhadas à agricultura sustentável. Essa abordagem, baseada na ecologia química do bicudo, permitiria um controle mais eficaz e ambientalmente responsável no setor canavieiro.

Por fim, as propostas biotecnológicas que abrangem desde o desenvolvimento de variedades transgênicas de cana-de-açúcar até o uso de GNSS representam uma mudança paradigmática no controle de *S. levis*. Essas tecnologias oferecem maior especificidade ao bloquear ou inativar moléculas-chave, reduzindo a dependência de pesticidas químicos e promovendo a sustentabilidade ambiental. Além disso, integram sinergicamente ecologia, precisão e genética. Para a implementação bem-sucedida dessa iniciativa, é crucial estabelecer mecanismos de transferência de tecnologia que conectem os centros de pesquisa ao setor produtivo, bem como marcos regulatórios que facilitem o uso responsável dessas técnicas.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada pelo projeto da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo [2017/25258-1], suporte financeiro da PROPE/UNESP no âmbito do Centro de Pesquisa em Engenharia - Fitossanidade da Cana-de-Açúcar (CEPENFITO), vinculado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

Declaração de Contribuição de Autoria CREDiT

Conceitualização: [ARR, DFLS], Metodologia: [ARR, DFLS], Análise e investigação formal: [ARR, NFR, DFLS, OAF, RAP]; Redação – preparação do rascunho original: [ARR, NFR];

Redação – revisão e edição: [ARR, OAF, RAP, DFLS]; Obtenção de financiamento: [OAF, RAP, DFLS]; Supervisão: [DFLS].

Declaração de Conflito de Interesses

Os autores declaram não possuir quaisquer interesses financeiros ou relações pessoais que possam ser percebidas como influenciando o trabalho apresentado neste artigo.

Referências bibliográficas

- Ávila, C. J. et al. (2023) Soil insects associated with sugarcane crop in Mato Grosso do Sul, Brazil, *Ciencia Rural*, 53(11), pp. 1–7. DOI: 10.1590/0103-8478cr20220333.
- Barreto-Triana, N., dos Santos Dias, C. T. and S. Bento, J. M. (2014) Reproductive behavior of the sugarcane weevil, *Sphenophorus levis* (Coleoptera: Curculionidae) in laboratory, *Revista Colombiana de Entomologia*, 40(2), pp. 265–271.
- Cameron, A. C. and Trivedi, P. K. (2013) Regression analysis of count data, Second edition, *Regression Analysis of Count Data, Second Edition*. University of California, Davis, United States: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9781139013567.
- Campanini, E. B. et al. (2012) Caracterização de novos isolados de *Bacillus thuringiensis* para o controle de importantes insetos-praga da agricultura, *Bragantia*, 71(3), pp. 362–369. DOI: 10.1590/S0006-87052012000300007.
- Casteliani, A. et al. (2020) Behavioral aspects of *Sphenophorus levis* (Coleoptera: Curculionidae), damage to sugarcane and its natural infection by *Steinernema carpocapsae* (Nematoda: Rhabditidae), *Crop Protection*, 137(105262), pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105262.
- Cícero, E. A. S., Ferraudo, A. S. and Lemos, M. V. F. (2009) Identificação de genes cry de *Bacillus thuringiensis* no controle de *Sphenophorus levis*, o bicudo da cana-de-açúcar, *Bragantia*, 68(4), pp. 817–823. DOI: 10.1590/s0006-87052009000400001.
- De Castro, S. G. Q. et al. (2019) Changes in Soil Pest Populations Caused by Sugarcane Straw Removal in Brazil, *Bioenergy Research*, 12(4), pp. 878–887. DOI: 10.1007/s12155-019-10019-4.
- Dinardo-Miranda, L. L. and Fracasso, J. V. (2013) Sugarcane straw and the populations of pests and nematodes, *Scientia Agricola*, 70(5), pp. 369–374. DOI: 10.1590/s0103-90162013000500012.
- Evangelista, D. E. et al. (2014) Expression, purification, crystallization and preliminary X-ray diffraction analysis of the pectin methylesterase from the sugar cane weevil *Sphenophorus levis*, *Acta Crystallographica Section F: Structural Biology Communications*, 70(3), pp. 331–334. DOI: 10.1107/S2053230X14001630.
- Evangelista, D. E. et al. (2015) Pectinases from *sphenophorus levis* vaurie, 1978 (Coleoptera: Curculionidae): Putative accessory digestive enzymes, *Journal of Insect Science*, 15(5), pp. 1–8. DOI: 10.1093/jisesa/ieu168.
- FAO (2024). FAO Statistic: Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Faria, L. V. et al. (2024) Artificial Diet for Immatures of *Sphenophorus levis* Vaurie, 1978 (Coleoptera: Curculionidae), Based on a Multidimensional Model, *Insects*, 15(12), pp. 1–13. DOI: 10.3390/insects15120944.
- Ferreira, P. H. U., Ferreira, M. D. C. and Vieira, E. (2024) Improving *Sphenophorus levis* Adult Mortality Through Solid Insecticide Applications and Increased Insecticide Dose, *Neotropical Entomology*, 53(6), pp. 1293–1308. DOI: 10.1007/s13744-024-01204-y.

- Fonseca, F. P. P. et al. (2011) Leviserpin: A serine peptidase inhibitor (Serpín) from the sugarcane weevil *Sphenophorus levis*, *Protein Journal*, 30(6), pp. 404–412. DOI: 10.1007/s10930-011-9345-x.
- Fonseca, F. P. P. et al. (2012) Recombinant expression, localization and in vitro inhibition of midgut cysteine peptidase (Sl-CathL) from sugarcane weevil, *Sphenophorus levis*, *Insect Biochemistry and Molecular Biology*. Elsevier Ltd, 42(1), pp. 58–69. DOI: 10.1016/j.ibmb.2011.10.008.
- Giometti, F. H. C. et al. (2011) Virulência de nematóides entomopatogênicos (Nematoda: Rhabditida) a *Sphenophorus levis* (Coleoptera: Curculionidae), *Bragantia*, 70(1), pp. 81–86. DOI: 10.1590/S0006-87052011000100013.
- Girón-Pérez, K. et al. (2009) Atração de adultos de *Sphenophorus levis* vaurie (coleoptera: Curculionidae) a fragmentos vegetais em diferentes estados de conservação, *Neotropical Entomology*, 38(6), pp. 842–846. DOI: 10.1590/S1519-566X2009000600019.
- Habrylo, O. et al. (2018) The pectinases from *Sphenophorus levis*: Potential for biotechnological applications, *International Journal of Biological Macromolecules*. Elsevier B.V., 112, pp. 499–508. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.01.172.
- Jabbour, C. J. C. (2013) Environmental training in organisations: From a literature review to a framework for future research, *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier B.V., 74, pp. 144–155. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.12.017.
- Leite, L. G. et al. (2023) Effects of temperature for optimizing production and storage of *Steinernema rarium* in a novel biphasic process, and efficacy of the nematode against *Sphenophorus levis*, *Biological Control*. Elsevier Inc., 187(October), pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2023.105381.
- Leite, L. G. et al. (2012) Efficiency of entomopathogenic nematodes and chemical insecticides against *Sphenophorus levis* and *Leucothyreus* sp. on sugarcane, *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 42(1), pp. 40–48. DOI: 10.1590/S1983-40632012000100006.
- Line, M. B. and Sandison, A. (1974) Progress in documentation “obsolescence” and changes in the use of literature with time, *Journal of Documentation*, 30(3), pp. 283–350. DOI: 10.1108/eb026835.
- Martín-Martín, A., Orduna-Malea, E. and Delgado López-Cózar, E. (2018) Coverage of highly-cited documents in Google Scholar, Web of Science, and Scopus: a multidisciplinary comparison, *Scientometrics*, 116(3), pp. 2175–2188. DOI: 10.1007/s11192-018-2820-9.
- Martins, L. F. et al. (2020) Attraction of the sugarcane billbug, *Sphenophorus levis*, to vinasse and its volatile composition, *Chemoecology*. Springer International Publishing, 30(5), pp. 205–214. DOI: 10.1007/s00049-020-00310-8.
- Mohan, C. et al. (2021) hRNAi-mediated knock-down of *Sphenophorus levis* V-ATPase E in transgenic sugarcane (*Saccharum* spp interspecific hybrid) affects the insect growth and survival, *Plant Cell Reports*. Springer Berlin Heidelberg, 40(3), pp. 507–516. DOI: 10.1007/s00299-020-02646-5.
- Mongeon, P. and Paul-Hus, A. (2016) The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis, *Scientometrics*, 106(1), pp. 213–228. DOI: 10.1007/s11192-015-1765-5.
- Naciones Unidas (2024) The Sustainable Development Goals Report, United Nations. Available at: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf>.
- Noronha, R. H. de F. et al. (2019) Application of signal correction for *Sphenophorus levis* control and higher quality production in mechanized harvesting of sugarcane ratoon,

- Australian Journal of Crop Science, 13(12), pp. 1936–1942. DOI: 10.21475/ajcs.19.13.12.p1487.
- Page, M. J. et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews, *The BMJ*, 372. DOI: 10.1136/bmj.n71.
- Pavlu, F. A. and Molin, J. P. (2016) Plano de amostragem e distribuição espacial para controle localizado de *Sphenophorus Levis* em cana-de-açúcar, *Acta Scientiarum - Agronomy*, 38(3), pp. 279–287. DOI: 10.4025/actasciagron.v38i3.28599.
- Pedezzi, R. et al. (2014) A novel β -fructofuranosidase in Coleoptera: Characterization of a β -fructofuranosidase from the sugarcane weevil, *Sphenophorus levis*, *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 55, pp. 31–38. DOI: 10.1016/j.ibmb.2014.10.005.
- Peixoto, P. G. et al. (2024) Attractiveness of Pitfall Traps with Baits for Harvestmen in a Sugarcane Agroecosystem, *Sugar Tech. Springer India*, 26(3), pp. 731–740. DOI: 10.1007/s12355-024-01390-4.
- Ribeiro, C. W. et al. (2008) Production of a His-tagged canecystatin in transgenic sugarcane and subsequent purification, *Biotechnology Progress*, 24(5), pp. 1060–1066. DOI: 10.1002/btpr.45.
- Rinke, R. et al. (2011) Microbial diversity in the larval gut of field and laboratory populations of the sugarcane weevil *Sphenophorus levis* (Coleoptera, Curculionidae), *Genetics and Molecular Research*, 10(4), pp. 2679–2691. DOI: 10.4238/2011.November.1.1.
- Rosa, J. O., Soares, J. R. S. and Fernandes, O. A. (2024) Harvest load transfer sites influence sugarcane billbug (Coleoptera: Curculionidae) spatiotemporal injury in sugarcane, *Pest Management Science*, 80(4), pp. 1771–1778. DOI: 10.1002/ps.7912.
- Santos-Cividanes, T. M., Cividanes, F. J., Garcia, J. C., Vilela, M., Moraes, J. C., & Barbosa, J. C. (2022). Silicon induces resistance to *Diatraea saccharalis* in sugarcane and it is compatible with the biological control agent *Cotesia flavipes*. *Journal of Pest Science*, 95(2), 783–795. DOI: 10.1007/s10340-021-01429-5.
- Schneider, V. K. et al. (2017) Transgenic sugarcane overexpressing CaneCPI-1 negatively affects the growth and development of the sugarcane weevil *Sphenophorus levis*, *Plant Cell Reports. Springer Berlin Heidelberg*, 36(1), pp. 193–201. DOI: 10.1007/s00299-016-2071-2.
- Shibao, P. Y. T. et al. (2021) Identification and functional analysis of a pseudo-cysteine protease from the midgut transcriptome of *sphenophorus levis*, *International Journal of Molecular Sciences*, 22(21), pp. 1–14. DOI: 10.3390/ijms222111476.
- Silva, M. S. O. et al. (2021) An assessment of *steinernema rarum* as a biocontrol agent in sugarcane with focus on *sphenophorus levis*, host-finding ability, compatibility with vinasse and field efficacy, *Agriculture (Switzerland)*, 11(6), pp. 1–16. DOI: 10.3390/agriculture11060500.
- Soares-Costa, A. et al. (2011) Digestive physiology and characterization of digestive cathepsin L-like proteinase from the sugarcane weevil *Sphenophorus levis*, *Journal of Insect Physiology*, 57(4), pp. 462–468. DOI: 10.1016/j.jinsphys.2011.01.006.
- Urach Ferreira, P. H. and Ferreira, M. da C. (2023) *Sphenophorus levis* Behavior Studies: Evaluating Insect Attractiveness or Repellency to One Insecticide Treatment and Assessing Nocturnal Insect Activity and Location Pattern, *Insects*, 14(2), pp. 1–15. DOI: 10.3390/insects14020205.
- Xavier, G. G. et al. (2024) Determining Factors and Economic Injury Levels for *Sphenophorus levis* for Chemical and Biological Control in Irrigated and Non-irrigated Sugarcane Crops,

Neotropical Entomology. Springer International Publishing, 53(4), pp. 955–963. DOI: 10.1007/s13744-024-01175-0.

Zarbin, P. H. G. et al. (2003) Identification of male-specific chiral compound from the sugarcane weevil *Sphenophorus levis*, Journal of Chemical Ecology, 29(2), pp. 377–386. DOI: 10.1023/A:1022634012212.

Zarbin, P. H. G. et al. (2004) Synthesis of (S)-(+)-2-Methyl-4-octanol: Male-Specific Compound Released by Sugarcane weevil *Sphenophorus levis* (Coleoptera: Curculionidae), Journal of the Brazilian Chemical Society, 15(2), pp. 331–334. DOI: 10.1590/S0103-50532004000200028.

Artigo 2

Como os modelos bioeconômicos contribuem para a sustentabilidade no manejo de pragas na agricultura?

Alex Rengifo Rojas

Universidade Nacional Agrária da Selva, Peru, Departamento Acadêmico de Ciências Econômicas, Tingo María, 10131 e Universidade Estadual Paulista, Brasil, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Centro de Pesquisa em Engenharia – Fitossanidade em Cana-de-Açúcar.

<https://orcid.org/0000-0002-7103-6903>

E-mail: alex.rengifo@unas.edu.pe

Nelino Florida Rofner

Universidade Nacional Agrária da Selva, Peru, Departamento Acadêmico de Ciências da Conservação do Solo e da Água, Tingo María, 10131.

<https://orcid.org/0000-0002-8751-4367>

E-mail: nelino.florida@unas.edu.pe

David Ferreira Lopes Santos.

Universidade Estadual Paulista, Brasil, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Centro de Pesquisa em Engenharia – Fitossanidade em Cana-de-Açúcar, Jaboticabal, 14.884-900.

<https://orcid.org/0000-0003-3890-6417>

E-mail: david.lopes@unesp.br

Resumo

Modelos bioeconômicos em culturas agrícolas são ferramentas que integram variáveis biológicas, econômicas, ambientais e sociais para apoiar a tomada de decisões no manejo de pragas, maximizando a produção e a rentabilidade e minimizando os custos de controle. Por meio de uma revisão sistemática da literatura científica no Scopus, foram selecionados 58 artigos relevantes. Esta análise identificou uma lacuna científica na aplicabilidade de referenciais teóricos como a teoria dos jogos e a economia comportamental, que são fundamentais para a compreensão e a resolução de problemas de ação coletiva entre agricultores no contexto do manejo de pragas. Essa necessidade orienta futuras pesquisas multidisciplinares. Em relação aos tipos de manejo de controle, a superioridade do manejo integrado de pragas (MIP) sobre o uso isolado de pesticidas químicos, agentes biológicos ou variedades geneticamente modificadas é evidente. Reconhece-se também que não existe uma solução única, uma vez que a eficácia de qualquer estratégia depende das condições ambientais, dos fatores socioeconômicos e do comportamento do agricultor. Demonstra-se que modelos dinâmicos e bioeconômicos, que incorporam a dimensão temporal e as compensações econômicas e ecológicas, são essenciais. Esses resultados revelam que as estratégias mais rentáveis no curto prazo podem se mostrar insustentáveis no longo prazo, destacando a necessidade de um planejamento estratégico com horizontes de longo prazo. Para o manejo futuro de pragas, recomenda-se o desenvolvimento e a implementação de estratégias integradas e adaptativas, apoiadas por modelos bioeconômicos robustos que considerem a dinâmica biológica, as restrições econômicas, as condições ambientais e o comportamento humano, a fim de fundamentar políticas agrícolas eficazes e sustentáveis.

Palavras-chave: Sustentabilidade agrícola, Bibliometria, Impacto econômico, Revisão sistemática, Controle ótimo, Limiar de dano econômico.

1 INTRODUÇÃO

O manejo de pragas em culturas agrícolas representa atualmente um desafio crítico que exige uma análise cuidadosa ([Gatwiri et al., 2024](#); [Melese, 2023](#)). Sua abordagem deve conciliar a segurança alimentar global, em conformidade com o ODS 2; o uso responsável de produtos químicos para alcançar a sustentabilidade ambiental, em conformidade com o ODS 13; e a rentabilidade econômica, a segurança e a saúde ocupacional dos agricultores, aspectos articulados aos ODS 2 e 8 ([Nações Unidas, 2024](#)).

As evidências mostram que as estratégias tradicionais, como a aplicação de pesticidas químicos ([Liu et al., 2015](#); [McKee, 2011](#)), têm impactos negativos na saúde pública ([Kundu & Mallick, 2024](#)), incentivam o desenvolvimento de resistência em pragas ([Abaraya-Abawari et al., 2023](#)), deterioram os ecossistemas ([Zevika et al., 2024b](#)) e a biodiversidade ([Fotso-Fotso et al., 2021](#)), gerando danos ambientais notórios ([Ghosh & Bhattacharya, 2010](#)) com repercussões a longo prazo ([Monteiro et al., 2024](#); [Yadav et al., 2024](#)).

Ao mesmo tempo, muitos agricultores empregam outras estratégias tradicionais com efeitos favoráveis ao meio ambiente, embora com resultados variáveis. Estas incluem a incorporação do consórcio de culturas ([Allen-Perkins & Estrada, 2019](#)), a eliminação de plantas infectadas ([Alemneh et al., 2021](#); [Qiu et al., 2024](#)), o uso de armadilhas ([Mwasunda & Mwambala, 2025](#); [Yemshanov et al., 2011](#)), sistemas agroflorestais com benefícios ecológicos ([Atallah et al., 2018](#)), fertilização do solo ([Schumacher et al., 2006](#)) e práticas culturais como poda, capina e fertilização ([Pérez-Marulanda & Giraldo-Sánchez, 2020](#)).

Outra alternativa é o controle biológico ([Régnier et al., 2023](#)), aplicado por meio da introdução de agentes biológicos como predadores naturais ([Trujillo-Salazar et al., 2024](#)) em estágios de ovo e larva ([Molter et al., 2023](#)), ou pelo uso de vírus e patógenos ([Qiu et al., 2024](#)). Da mesma forma, o manejo de pragas é praticado por meio da incorporação de plantas geneticamente modificadas ([Catarino et al., 2019](#); [Shankar & Thirtle, 2005](#)), sujeitas a regulamentações rigorosas e adoção limitada ([Linacre & Thompson, 2004](#); [McKee et al., 2009](#)), e regulamentação fitossanitária por organizações ambientais ([Consmüller et al., 2010](#)) e de proteção ambiental ([Chowdhury et al., 2019](#)).

No entanto, a eficácia limitada do controle biológico e de muitas práticas agrícolas, em contraste com a alta eficiência e o significativo impacto ambiental dos pesticidas químicos, levou à adoção do Manejo Integrado de Pragas (MIP) ([Hall & Buncan, 1984](#)). Essa abordagem busca maximizar a eficácia do controle, minimizando os danos ambientais ([Raezah et al., 2024](#)), combinando diversas estratégias, como o controle biológico e químico ([Qin et al., 2023](#)); o controle biológico com plantas geneticamente modificadas ([Dos Anjos et al., 2023](#)); pesticidas químicos com plantas geneticamente modificadas ([Brown et al., 2021](#); [Linacre & Thompson, 2004](#)); o melhoramento genético de plantas com fertilização e pesticidas químicos ([Afidchao et al., 2014](#)); e pesticidas químicos com práticas agrícolas ([Parry, 2022](#)).

Os modelos bioeconômicos aplicados às culturas visam maximizar a produtividade ([Ghosh & Bhattacharya, 2010](#)), a rentabilidade ([Skevas et al., 2014](#)) e os benefícios econômicos ([Catarino et al., 2019](#)), bem como minimizar os custos de produção ([Zevika et al., 2024a](#)) e os custos associados ao controle de pragas ([Melese, 2023](#)). Esses modelos recebem esse nome devido à integração de variáveis biológicas, como populações de pragas, plantas, predadores e parasitas ([Suganya et al., 2024](#)), presença de vírus ([Qiu et al., 2024](#)), microrganismos ([Huang et al., 2023](#)) e biomassa vegetal ([Mwasunda & Mwambala, 2025](#)). Eles também incorporam fatores ambientais como temperatura, umidade, radiação solar, direção do vento ([Campos et al., 2022](#)), disponibilidade de recursos ([Herskowitz et al., 2023](#)), textura e nutrientes do solo ([Liu et al., 2015](#)) e interações com os ecossistemas ([Qin et al.,](#)

2022). Além desses aspectos, existem dimensões sociais, como o nível de conscientização dos agricultores (Anwar et al., 2023), a cooperação entre agricultores (Reeves et al., 2017), sua percepção das práticas agrícolas (Gonthier et al., 2023) e a influência de organizações ambientais (Consmüller et al., 2010).

Uma limitação recorrente identificada na literatura é a falta de um consenso teórico unificado que sustente a estrutura dos modelos bioeconômicos. Essa questão tem sido abordada por meio de diversas abordagens, incluindo dinâmica populacional e modelos ecológicos (Liang et al., 2016), modelagem econométrica (Brown et al., 2021), controle ótimo baseado no princípio de Pontryagin (Hong et al., 2019), otimização bioeconômica dinâmica (Cook & Broughton, 2023), o uso de equações diferenciais com atraso, estabilidade dinâmica e métodos numéricos (Bhagat & Kumar, 2023), bem como a aplicação da teoria dos jogos e da economia comportamental (Reeves et al., 2017). Outra limitação significativa reside na construção incompleta ou inconclusiva dos modelos, o que frequentemente resulta em representações que não se conformam totalmente à realidade agroecológica. Por exemplo, o modelo de Al Basir et al. (2023) considera o cuidado ambiental, mas omite as condições climáticas; McKee (2011) incorpora a dinâmica populacional de pragas, mas não o comportamento de plantações agrícolas; e Dharmaraja et al. (2020) incluem estágios de crescimento de plantas, mas não o impacto de ataques de pragas.

Além dessas limitações, existem outras deficiências metodológicas. O trabalho de Al Basir et al. (2019) baseia-se exclusivamente em simulações que não refletem necessariamente as condições reais de campo, levantando questões sobre a validade externa de seus resultados. Por sua vez, Hopper (2023) não considera dados longitudinais, o que impede a avaliação de tendências e impactos a longo prazo. Finalmente, o modelo proposto por Leal-Ramírez et al. (2015) utiliza pressupostos biológicos que são invariáveis ao longo do tempo. No entanto, na prática, esses parâmetros estão sujeitos a variações devido a fatores ecológicos, climáticos e evolutivos.

Portanto, esta revisão sistemática visa sintetizar e analisar criticamente a literatura científica que emprega modelos de integração bioambiental-econômica para o controle de pragas agrícolas. Os resultados dessa abordagem integrada buscam fornecer uma perspectiva abrangente para a identificação de estratégias de controle eficazes, sustentáveis e economicamente viáveis. Da mesma forma, o trabalho busca esclarecer as tendências atuais, as lacunas de conhecimento e as futuras direções para pesquisas multidisciplinares nessa área.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo implementou uma abordagem metodológica híbrida. Primeiramente, a metodologia PRISMA 2020 foi aplicada para a revisão sistemática, garantindo rigor nos processos de seleção, análise e síntese de evidências científicas (Haddaway et al., 2022). Essa estrutura metodológica possibilitou a padronização dos protocolos de busca, avaliação e relato dos resultados. Em segundo lugar, a abordagem proposta por Chippetta-Jabbour (2013) foi incorporada, utilizando técnicas de codificação e criptografia para facilitar o processamento e a análise sistemáticos da literatura científica. Essa combinação metodológica permitiu otimizar tanto a qualidade da revisão quanto a eficiência no manuseio de grandes volumes de informação acadêmica. A Figura 1 apresenta todas as metodologias utilizadas.

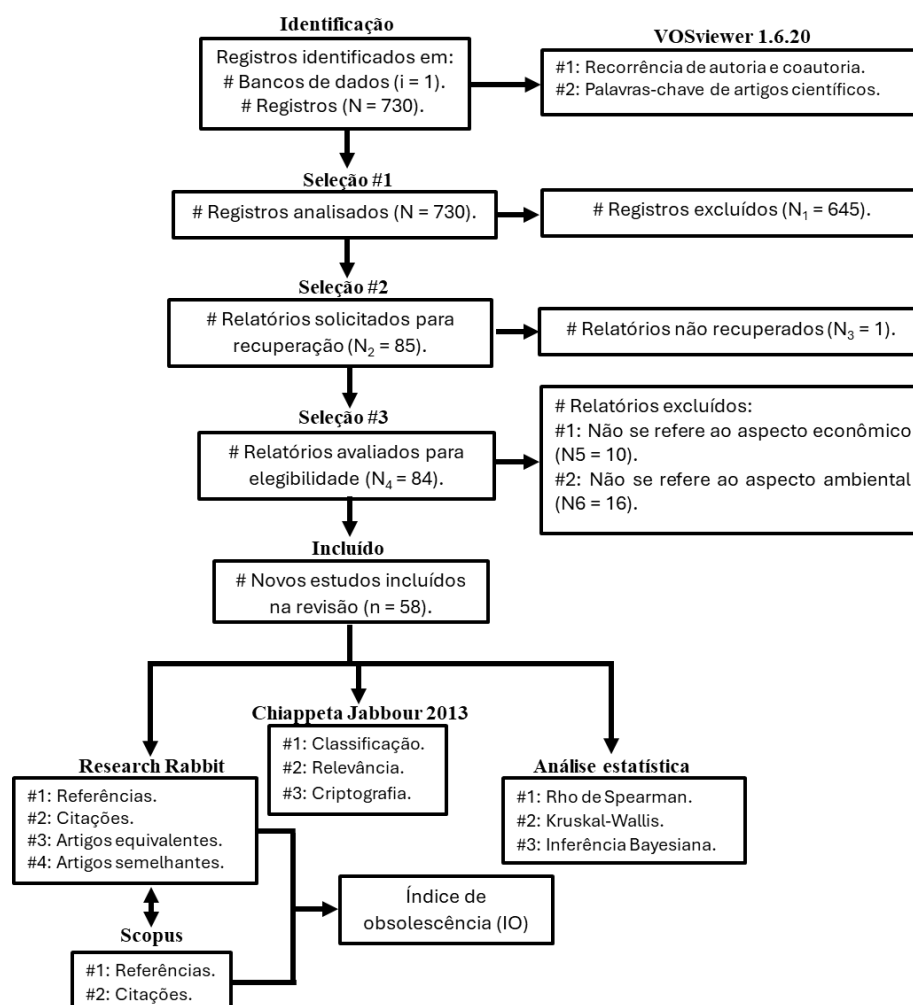


FIGURA 6. Fluxograma adotado para o processo de seleção e análise de artigos no Scopus.

A Figura 1 apresenta o fluxo metodológico completo seguido nesta revisão sistemática. O processo é detalhado sequencialmente a seguir:

2.1 Identificação:

A base de dados Scopus foi utilizada para localizar artigos científicos relacionados a modelos bioeconômicos em culturas que integram aspectos biológicos, econômicos e ambientais. A estratégia de busca utilizada, com prazo final em março de 2025, foi a seguinte:

(TITLE-ABS-KEY("bioeconom* model*" OR "bioeconomic model*" OR econometr* OR "Quantitat* method*" OR "statistic* model*" OR "mathemat* model*") AND TITLE-ABS-KEY("pest control" OR "pest management" OR "biologic* control*" OR "injur* control*" OR "injur* management" OR entomolog*) AND NOT TITLE-ABS-KEY(animal*)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"IMMU") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"MATH") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"BIOC") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"ECON") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"BUSI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE,"Spanish") OR LIMIT-TO (LANGUAGE,"Portuguese")).

2.1.1 VOSviewer versão 1.6.20

Após a aplicação dessa cadeia, um total de N = 730 registros foram identificados e exportados em formato CSV para posterior análise bibliométrica utilizando o software

VOSviewer (versão 1.6.20). A escolha dessa ferramenta baseia-se em sua comprovada capacidade de mapear e visualizar redes bibliométricas complexas de forma intuitiva e rigorosa, o que a torna um padrão em revisões sistemáticas ([van Eck & Waltman, 2010](#)). Sua utilidade foi demonstrada na análise de redes de coautoria, permitindo a identificação e visualização de colaborações entre pesquisadores.

Essa abordagem esclarece a estrutura social da pesquisa, mostra núcleos de colaboração multidisciplinar e reconhece variáveis-chave sob perspectivas ambientais, biológicas e econômicas ([van Eck & Waltman, 2017](#)). Também permitiu a análise da coocorrência de palavras-chave, o que facilitou a descoberta de tendências temáticas, evolução conceitual e interconexões entre diferentes domínios do conhecimento, revelando possíveis lacunas de integração entre disciplinas ainda incipientes ([Arruda et al., 2022](#)).

2.2 Seleção:

Os títulos e resumos dos $N = 730$ artigos foram avaliados. Nesta fase, $N_1 = 645$ registros foram excluídos por não estarem relacionados a culturas agrícolas, e $N_3 = 1$ registro foi excluído devido à impossibilidade de acesso ao texto completo. Como resultado, $N_4 = 84$ artigos foram considerados elegíveis para avaliação do texto completo. Destes, 26 documentos foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão: $N_5 = 10$ documentos por não abordarem aspectos econômicos e $N_6 = 16$ documentos por não fazerem referência a elementos ambientais.

2.3 Inclusão:

O número total de artigos incluídos na revisão sistemática foi $n = 58$. Esses trabalhos foram extraídos do Scopus e gerenciados pelo software Mendeley para citação e referência.

2.3.1 Research Rabbit

Posteriormente, o DOI de cada documento foi extraído para uso no Research Rabbit. Essa ferramenta contribuiu para o mapeamento das conexões entre as publicações e a quantificação do impacto científico da literatura identificada ([Sharma et al., 2022](#)). Essa ferramenta de IA possibilitou o cálculo de métricas como o número total de citações, o ano da primeira e da última referência de cada artigo e o número de artigos equivalentes e similares para cada revisão. No entanto, como o Research Rabbit opera apenas com artigos disponíveis em seu site, a análise foi complementada com a plataforma Scopus para garantir a completude e a robustez dos resultados.

2.3.2 Research Rabbit + Scopus = Índice de Obsolescência (IO)

A combinação de IA e Scopus possibilitou estimar o IO, determinando o período de validade de cada artigo antes que se torne obsoleto. Esse indicador, amplamente utilizado, como evidenciado em [Medina-González et al. \(2024\)](#), foi calculado seguindo a metodologia proposta por [Line & Sandison \(1974\)](#), utilizando a Equação 1:

$$OI = F_{n/2} - f_1 \quad (1)$$

Onde:

- $F_{n/2}$ representa o ano correspondente à mediana do conjunto de referências bibliográficas (n) do artigo em análise.
- f_1 corresponde ao ano de publicação da primeira referência bibliográfica citada no mesmo artigo.

2.3.3 Chiappetta Jabbour (2013)

Com base nas palavras-chave de coocorrência obtidas com o VOSviewer e em consonância com os 58 documentos incluídos, os artigos foram agrupados de acordo com o Tema Principal descrito na Tabela 1, seguindo a metodologia de categorização proposta por

Chiappetta-Jabbour (2013). A Tabela 1 inclui aspectos de Classificação, Relevância e Criptografia.

TABELA 2. Classificação e relevância da literatura científica utilizando criptografia

Classificação	Relevância	Criptografia
1	Tema principal	A – Ambiental
		B – Biológico
		C – Agrônomo
		D – Governança
		E – Social
		F – Econômico
2	Tipo	A – Estudo teórico
		B – Estudo quantitativo
		C – Estudo qualitativo
		D – Estudo misto: quantitativo e qualitativo
		E – Estudo bibliométrico ou revisão
3	Desenho	A – Série temporal
		B – Corte transversal
		C – Painel de dados
		D – Experimento
		E – Literatura
4	Objetivo da modelagem	A – Produção ou produtividade
		B – Lucro líquido
		C – Custos
		D – Estabilidade da safra
		E – Benefícios econômicos
		F – Rentabilidade econômica
		G – Adoção de variedades
5	Resultados	H – Manejo de pragas
		I – Danos econômicos
		A – Novas conclusões
		B – Consistente com a literatura
		C – Em conflito com a literatura

A classificação segue uma numeração sequencial que relaciona a Relevância a uma avaliação qualitativa da contribuição substancial para o Tema Principal, Tipo, Desenho, Objetivo da Modelagem e Resultados dos 58 artigos. Posteriormente, foi aplicada uma codificação criptográfica com as palavras mais relevantes que caracterizam cada artigo. Assim, a Tabela 1 apresenta uma metodologia estruturada que garante a categorização precisa de acordo com as características metodológicas, a identificação de contribuições substanciais na literatura e a rastreabilidade analítica por meio de um sistema de codificação integrado.

2.3.4 Teste de Correlação: Intervalo de Spearman (ρ)

O teste do coeficiente de correlação de Spearman (ρ), proposto por **Spearman (1904)**, foi utilizado para medir a correlação entre as referências dos artigos como estratégia para avaliar a evolução temporal. Isso possibilitou determinar se a revisão se baseia predominantemente em literatura recente ou se inclui estudos antigos. Também permitiu identificar tendências de pesquisa crescentes, decrescentes ou estáveis ao longo do tempo e detectar potenciais vieses temporais em artigos com resultados positivos, negativos ou nulos.

2.3.5 Teste estatístico não paramétrico de Kruskal-Wallis

O teste de Kruskal-Wallis, proposto por **Kruskal e Wallis (1952)**, foi utilizado para determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre as medianas dos seis tipos de modelos em função do número de citações da primeira e da última referência, das coincidências bibliográficas e do índice de obsolescência. Essas métricas bibliométricas, que correspondem a dados de razão com viés positivo e não atendem à suposição de normalidade,

foram analisadas utilizando este teste não paramétrico. Essa abordagem permitiu quantificar se o tipo de modelo conceitual utilizado em um artigo está relacionado a um perfil bibliométrico estatisticamente diferenciado ou se é atribuível ao acaso. Essa análise é crucial para identificar padrões ocultos que nos permitem afirmar, com suporte estatístico, se certos tipos de modelos exibem tendências associadas a um maior impacto ou a uma estrutura de literatura mais recente ou mais antiga. Ela pode servir como guia para futuras pesquisas que integrem aspectos biológicos, ambientais e econômicos no controle de pragas em culturas agrícolas.

2.3.6 Inferência Bayesiana e Teste Exato de Fisher

Por fim, ferramentas estatísticas avançadas, como a Inferência Bayesiana e o Teste Exato de Fisher, foram aplicadas para analisar quantitativamente os resultados extraídos de cada artigo, avaliando a força de suas conclusões. Os fatores de Bayes, propostos por [Kass e Raftery \(1995\)](#), possibilitaram quantificar as evidências em favor de uma hipótese em detrimento de outra, facilitando a tomada de decisão em situações de incerteza por meio de uma árvore de decisão (Figura 2). Essa árvore estrutura visualmente diferentes intervenções — como controle biológico e químico, práticas agrícolas e melhoramento genético — e seus prováveis resultados em termos de aumento de renda e redução de custos. Após a atribuição de probabilidades, avaliações, interpretações das evidências e recomendações práticas, a análise prosseguiu.

O uso do Teste Exato de Fisher, metodologicamente fundamentado por [Fu & Arnold \(1992\)](#), mostrou-se robusto para amostras pequenas e baixas frequências esperadas. Da mesma forma, o cálculo da razão de chances (OR), seguindo a metodologia de [Breslow \(1981\)](#), forneceu uma medida clara e de fácil interpretação da força e da direção da relação entre o tipo de controle de pragas e o resultado econômico.

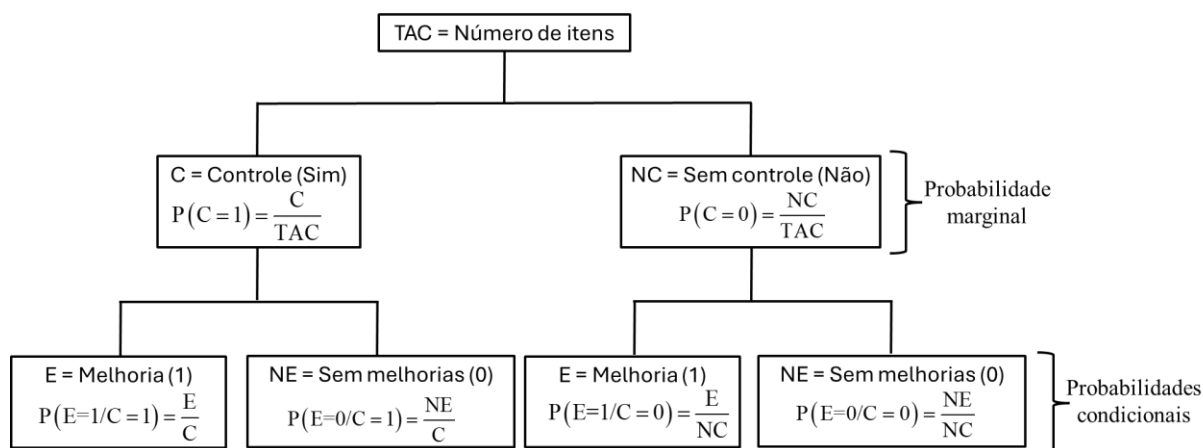


FIGURE 7. Árvore de decisão com probabilidades de artigos científicos de revisão sistemática

A partir da árvore de decisão (Figura 2), derivam-se as seguintes probabilidades conjuntas, expressas nas Equações (2) a (5):

$$P(E=1 \cap C=1) = P(E=1/C=1) * P(C=1) \quad (2)$$

$$P(E=0 \cap C=1) = P(E=0/C=1) * P(C=1) \quad (3)$$

$$P(E=1 \cap C=0) = P(E=1/C=0) * P(C=0) \quad (4)$$

$$P(E=0 \cap C=0) = P(E=0/C=0) * P(C=0) \quad (5)$$

3 RESULTADOS

Para a análise das redes de coautoria, os autores foram definidos como a unidade de análise, estabelecendo-se um limite mínimo de um documento por autor. Esse procedimento permitiu a identificação de 4 clusters que agrupam autores e coautores de acordo com seus

padrões de colaboração. O agrupamento foi determinado com base na métrica de força de vínculo, medida pela força total das conexões de coautoria entre eles (Figura 3A).

Em relação à análise de coocorrência de palavras-chave, todas as palavras-chave foram consideradas a unidade de estudo, com um limiar mínimo de 4 ocorrências. Antes dessa análise, a lista foi limpa para evitar duplicações, padronizando os termos com o uso de tesauros. Esse processo de normalização permitiu o estudo de 398 palavras-chave únicas, cujas inter-relações foram quantificadas pelo cálculo da força total de ligação de suas coocorrências (Figura 3B).

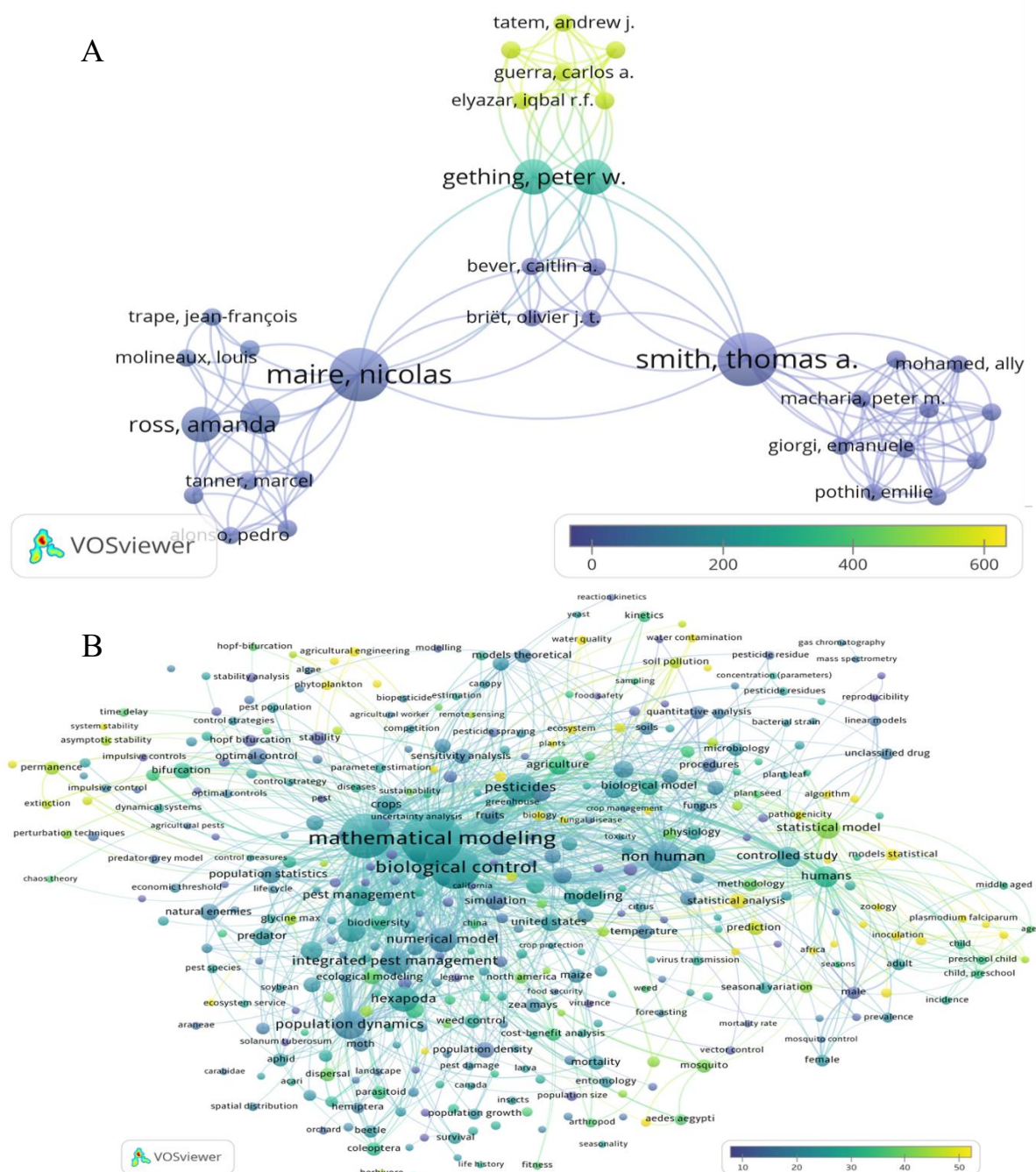


FIGURA 8. Recorrência de autores-coautores (A) e palavras-chave de artigos científicos (B).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3A, foram identificados quatro grupos distintos de autores e coautores, cada um com padrões diferentes de colaboração e impacto científico. O primeiro grupo reúne 11 autores que colaboram, com uma força de ligação total de 10. Este grupo publicou um artigo em conjunto, que recebeu 25 citações. Uma exceção

notável é o pesquisador "Smith Thomas A.", que possui três artigos (77 citações) e colabora com outros 17 autores, com base na força de suas conexões.

O segundo grupo também é composto por 11 autores. Entre eles, cinco pesquisadores são coautores de um artigo com 36 citações (intensidade de vínculo: 7), enquanto três autores compartilham uma publicação com 55 citações e colaboram com outros cinco pesquisadores. Além disso, dois membros deste grupo produziram dois artigos juntos (91 citações) e mantêm vínculos com 12 pesquisadores diferentes. Destaca-se o caso de "Maire Nicolas", autora de três artigos (111 citações) e colaboradora de outros 19 pesquisadores.

No terceiro grupo, composto por oito autores, destaca-se um subgrupo de seis pesquisadores, que são coautores de sete artigos com 537 citações. Além disso, Gething Peter W. e Smith David L. colaboraram em duas publicações (557 citações) e têm conexões com outros 14 pesquisadores. O quarto grupo inclui quatro autores que publicaram um artigo em conjunto (20 citações) e colaboram com outros sete pesquisadores.

Fora desses grupos, foram identificados autores independentes com contribuições significativas. Chen Lansun publicou 18 artigos (774 citações) e colabora com 21 coautores. Por outro lado, Lu Yanhui e Wyckhuys Kris A.G. têm dois artigos cada (66 citações) e trabalham com 27 pesquisadores. Em contrapartida, 63 autores não registram citações, apesar de terem publicado pelo menos um artigo em colaboração.

Esses autores se especializam principalmente no desenvolvimento de modelos matemáticos epidemiológicos e espaciais, bem como em modelos estatísticos aplicados a estudos demográficos. Em termos de origem, os grupos 1 e 2 são compostos por 60% de autores afiliados a instituições na Suíça. Em comparação, os 40% restantes estão distribuídos entre o Reino Unido, Bélgica, Tanzânia, Moçambique, Espanha, Madagascar e Senegal. Os grupos 3 e 4 apresentam uma distribuição diferente: 42% dos autores são dos Estados Unidos e os 58% restantes provêm de diversos países, como Indonésia, Austrália, Reino Unido, Suécia e Suíça.

As pesquisas realizadas por esses grupos se concentram principalmente no estudo do mosquito, abordando seu controle por meio de estratégias como fumigação com pesticidas, métodos biológicos e análise dos custos associados. Analisam também as doenças transmitidas por esse vetor, como malária, chikungunya e dengue, em relação a fatores ambientais. Cabe ressaltar que, além dessa linha de pesquisa, diversos autores também conduzem estudos sobre outras doenças relevantes para a saúde pública, como diabetes, câncer e tuberculose.

A Figura 3B apresenta uma análise de coocorrência de 398 palavras-chave extraídas de 730 artigos indexados no Scopus. As relações entre os termos foram organizadas em 7 grupos, identificando as palavras mais relevantes de acordo com a métrica de resistência total da ligação:

O Cluster 1 concentra-se no "Controle biológico" em ecossistemas de insetos, sendo este o termo central associado a "Ecologia", "Hexapoda", "Controle de insetos", "Dinâmica populacional" e "Predador". Essas relações refletem a interação predador-presa e o comportamento das populações.

O Cluster 2 destaca-se pela "Modelagem matemática" aplicada ao "Controle de pragas". Quando combinada com termos como "Bifurcação", "Simulação computacional", "Controle de doenças", "Otimização", "Manejo de pragas" e "Estatísticas populacionais", essa abordagem demonstra um método quantitativo e teórico voltado para a previsão da dinâmica de pragas e a otimização de estratégias de controle para culturas agrícolas.

O Cluster 3 estabelece uma ligação entre teoria e prática através de dois conceitos centrais: "Manejo Integrado de Pragas" como um mecanismo de controle que considera múltiplos métodos, e "Modelo Numérico" como uma técnica para sua avaliação. A associação com "Impacto Ambiental", "Herbicidas", "Inseticidas" e "Controle de Ervas Daninhas" reflete uma preocupação explícita com os efeitos do controle químico, que o manejo integrado busca minimizar.

O Cluster 4, através das palavras-chave "Modelos biológicos" e "Não humanos", juntamente com "Bactérias", "Frutas", "Modelos teóricos", "Doenças de plantas", "Revista prioritária" e "Temperatura", demonstra pesquisa em "Biocontrole" em nível microbiológico e laboratorial, com alto uso de experimentos ("Estudo controlado") e modelagem teórico-aplicada.

O Cluster 5 concentra-se em "Humanos" e "Estatísticas de Modelos", revelando a "Previsão" e a "Análise Estatística" de "Epidemias" na saúde humana. A inclusão de "Mosquitos" delimita diretamente a pesquisa sobre doenças transmitidas por vetores, como malária e dengue, em diferentes faixas etárias.

O Cluster 6 destaca o uso da "Modelagem" ecológica associada a "Espécies invasoras" e "Mudanças climáticas", para compreender suas ameaças. A integração com "Modelagem ecológica", "Silvicultura" e "Simulação" reflete uma perspectiva ampla para abordar os efeitos de perturbações globais em sistemas complexos.

O Cluster 7 mostra a aplicação de técnicas de controle por meio de "Pesticidas" na "Agricultura", demonstrando uma área de trabalho focada na eficácia, desenvolvimento e efeitos indiretos de pesticidas químicos.

Os termos mais frequentes "Controle de pragas" (191 ocorrências), "Modelagem matemática" (275) e "Controle biológico" (181) apresentaram os maiores valores de coocorrência, com forças de ligação totais de 1666, 2230 e 1432, respectivamente, refletindo sua centralidade temática na literatura analisada.

Adicionalmente, foram identificadas 104 palavras-chave de baixa frequência (coocorrência = 5) com forças de ligação variando de 20 a 90. Entre esses termos menos frequentes estão: "Modelagem agrícola", "Controle químico de pragas", "Custo-benefício" e "Produtividade".

Esse padrão de distribuição oferece um duplo valor acadêmico: os termos de alta frequência facilitam a recuperação de literatura especializada. Em contrapartida, os termos de baixa frequência apontam para nichos de pesquisa emergentes que podem orientar estudos futuros.

3.1. Utilizando o Research Rabbit

A integração dos resultados do Research Rabbit com a análise de rede realizada no VOSviewer facilitou uma abordagem mais abrangente para a visualização de redes de coautoria. Essa sinergia metodológica permitiu identificar com maior precisão tendências temporais, núcleos temáticos prioritários e lacunas na literatura existente sobre modelagem bioeconômica aplicada a culturas agrícolas.

	A11-Qin et al. (2023)	China	1B-1C	2B	3A	4C-4I	5A
	A12-Qiu et al. (2024)	China	1B-1C	2B	3A	4A-4H	5A
	A13-Raezah et al. (2024).	Arábia Saudita-Índia	1B-1C	2B	3A	4A-4H	5A
	A14-Suganya et al. (2024)	Índia	1B-1C	2B	3A	4A-4H	5A
	A15-Trujillo-Salazar et al. (2024)	Colômbia	1B-1C	2B	3A	4A	5A
	A16-Yadav et al. (2024)	Índia	1B-1C	2B	3A	4A	5A
	A17-Yemshanov et al. (2011)	Canadá	1A-1F	2B	3D	4I	5A
B-Modelos Econométricos	B1-Afidchao et al. (2014)	Filipinas	1C-1F	2B	3A	4A-4B-4C	5A
	B2-Atallah et al. (2018).	Colômbia	1A-1F	2B	3D	4A-4E	5A
	B3-Brown et al. (2021)	Filipinas	1E-1F	2B	3A	4A-4G	5A
	B4-Campos et al. (2022)	Peru	1A-1C	2B	3A	4A-4C	5A
	B5-Cons Müller et al. (2010)	Alemanha	1E-1F	2B	3A	4A	5A
	B6-Dharmaraja et al. (2020)	Índia	1C-1F	2B	3A	4A	5A
	B7-Hall and Buncan (1984)	Estados Unidos	1E-1F	2B	3A	4E-4F	5A
	B8-Liu et al. (2015)	Estados Unidos	1C-1F	2B	3A	4B	5A
	B9-Pérez Marulanda y Giralbo Sánchez (2020)	Colômbia	1B-1C	2B	3A	4A	5A
	B10-Régnier et al. (2023)	África	1A-1B	2B	3A	4A	5A
	B11-Schumacher et al. (2006)	Estados Unidos	1C-1F	2B	3D	4F	5A
	B12-Shankar and Thirtle (2005)	África do Sul	1E-1F	2B	3A	4A-4G	5A
	B13-Skevas et al. (2014)	Estados Unidos	1A-1F	2B	3A	4C-4F	5A
C-Controle ótimo e princípio de Pontryagin	C1-Abaraya Abawari et al. (2023)	Etiópia	1B-1F	2B	3A	4A-4H	5A
	C2-Alemneh et al. (2021)	Etiópia	1A-1B	2B	3A	4A-4C	5A
	C3-Chowdhury et al. (2019)	Índia	1A-1B	2B	3A	4A-4C	5A
	C4-Fotso Fotso et al. (2021)	Camarões	1B-1F	2B	3A	4C-4E	5A
	C5-Ghosh and Bhattacharya (2010)	Índia	1A-1B	2B	3A	4A-4C	5A
	C6-Hong et al. (2019)	Estados Unidos	1A-1F	2B	3A	4B-4E	5A
	C7-Kundu and Mallick (2024)	Bangladesh	1C-1F	2B	3A	4C-4E	5A
	C8-Melese (2023)	Etiópia	1B-1F	2B	3A	4C	5A
	C9-Molter et al. (2023)	Brasil	1B-1C	2B	3A	4C	5A
	C10-Zevika et al. (2024a)	Indonésia	1B-1C	2B	3A	4A-4C	5A
	C11-Zevika et al. (2024b)	Indonésia	1B-1F	2B	3A	4A-4H	5A
	C12-Zhang and Swinton (2009).	Estados Unidos	1B-1F	2B	3A	4F	5A
D- Modelos Bioeconomia e otimização dinâmica	D1-Catarino et al. (2019).	Europa	1B-1F	2B	3A	4E	5A
	D2-Catarino et al. (2016).	Espanha	1B-1F	2B	3A	4A-4H	5A
	D3-Cook and Broughton (2023)	Austrália	1A-1F	2B	3C	4E	5A
	D4-Marten and Moore (2011)	Estados Unidos	1A-1F	2B	3D	4C	5A
	D5-McKee (2011)	Estados Unidos	1C-1F	2B	3A	4E	5A
	D6-McKee et al. (2009)	Estados Unidos	1C-1F	2B	3A	4E	5A
	D7-Parry (2022)	Austrália	1A-1F	2B	3A	4A-4C-4E	5A
	D8-Qin et al. (2022)	China	1B-1C	2B	3D	4A	5A
	D9-Yang et al. (2016)	Estados Unidos	1B-1F	2B	3D	4E	5A
E-Equações Diferenciais com atraso, estabilidade dinâmica e métodos numéricos	E1-Al Basir et al. (2019)	Índia	1B-1E	2B	3A	4A-4D	5A
	E2-Al Basir et al. (2023)	Índia	1B-1C	2B	3A	4A-4D	5A
	E3-Anwar et al. (2023)	Paquistão-Taiwan	1B-1C	2B	3A	4A	5A
	E4-Bhagat and Kumar (2023)	Índia	1B-1C	2A	3A	4A	5A
	E5-Hopper (2023)	Estados Unidos	1B-1C	2B	3A	4A	5A
	E6-Monteiro et al. (2024)	Brasil	1A-1C	2B	3A	4A-4H	5A
F-Teoria dos jogos e Economia do comportamento	F1-Reeves et al. (2017)	Japão	1D-1E	2AB	3A	4B-4H	5A

A distribuição temática na literatura analisada é diversa. 36,21% dos autores abordam aspectos biológicos e agrônômicos (1B, 1C), predominando nos Modelos A e E. Da mesma forma, 15,52% focam em fatores biológicos e econômicos (1B, 1F), concentrando-se principalmente nos Modelos C e D. Os temas ambiental e financeiro (1A, 1F) e agrônômico e econômico (1C, 1F) representam cada um 12,07% dos autores, com maior presença nos Modelos B e D. Em contrapartida, identificam-se temas menos frequentes: ambiental e biológico (1A, 1B), presente nos Modelos A e C (10,34%); social e econômico (1E, 1F), presente no Modelo B (6,90%); ambiental e agrônômico (1A, 1C), presente nos Modelos B e E (3,45%); biológico e social (1B, 1E), associado ao Modelo E (17,72%); e governança e social (1D, 1E), restrito ao Modelo F (1,72%).

Em relação ao tipo de pesquisa, predomina a abordagem quantitativa (2B), presente em 96,55% dos trabalhos analisados, que utilizam modelos baseados em cálculos numéricos. Apenas 3,45% dos estudos de pesquisa adotam uma abordagem qualitativa (2A), desenvolvendo modelos conceituais sem simulações numéricas, principalmente nos Modelos A e E.

Em relação aos delineamentos de pesquisa, destaca-se o uso de estudos de séries temporais (3A), empregado por 84,48% dos autores. Esses modelos, presentes em todas as categorias analisadas, permitem avaliar o comportamento das variáveis utilizando dados primários, secundários ou combinados. Em menor escala, 13,79% dos estudos utilizam delineamentos experimentais (3D) com mensuração temporal, concentrados nos Modelos A, B e D. Por fim, apenas 1,72% dos trabalhos utilizam delineamentos de painel de dados (3C), o que sugere um interesse limitado no estudo simultâneo de múltiplas culturas ou pragas ao longo do tempo.

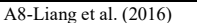
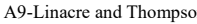
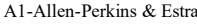
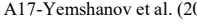
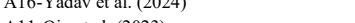
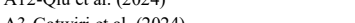
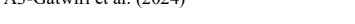
Os objetivos da modelagem variam de acordo com os componentes analisados (biológicos, ambientais, sociais ou econômicos). 27,59% dos autores buscam mensurar a produção ou produtividade (4A) das culturas, com maior presença nos Modelos A, B e E. 15,52% avaliam a produção ou produtividade juntamente com o manejo de pragas (4A, 4H), concentrando-se no Modelo A. 10,34% mensuram os benefícios econômicos (4E), principalmente no Modelo D, enquanto 8,62% analisam a produção ou produtividade com os custos de controle de pragas (4A, 4C), posicionando-se no Modelo C. 5,17% abordam exclusivamente os custos de controle de pragas (4C) nos Modelos C e D.

Menos frequentemente (17,24% no total), os estudos se concentram na quantificação da produção ou produtividade com estabilidade da cultura (4A, 4D), adoção de variedades (4A, 4G), custos de controle com benefícios econômicos (4C, 4E), custos de controle com rentabilidade (4C, 4F) e rentabilidade econômica (4F), distribuídos em vários modelos, exceto nos Modelos D e F. Finalmente, os 15,52% restantes abordam combinações como produção/produtividade com benefícios econômicos (4A, 4E), renda líquida com manejo de pragas (4B, 4H), danos econômicos (4I), entre outros. Como principal resultado, a maioria dos autores apresenta conclusões inéditas (5A) do ponto de vista teórico e prático, com exceção do estudo de [Gatwiri et al. \(2024\)](#), cujos resultados são consistentes com a literatura existente.

3.3. Análise bibliométrica de referências e padrões de citação em artigos de revisão

De acordo com os dados da Tabela 3, a análise das referências bibliográficas e citações mostra que os artigos classificados nos Modelos C, D e E apresentam uma gama mais ampla de referências bibliográficas (30-122) em comparação com os Modelos A, B e F (16-79), destacando-se como exceção o trabalho de [Régnier et al. \(2023\)](#) (B10) com 109 referências. Em termos de citações, os artigos mais citados (≥ 20 citações) concentram-se principalmente nos Modelos B e C. Dois casos excepcionais se destacam: [Marten e Moore \(2011\)](#) (D4) com 44 citações e [Al Basir et al. \(2019\)](#) (E1) com 54 citações. Artigos com citações intermediárias (10-19 citações) distribuem-se principalmente entre os Modelos A e B, incluindo casos particulares em outros modelos, como [Fotso-Fotso et al. \(2021\)](#) (C4) com 11 citações, [Cook e Broughton \(2023\)](#) (D3) com 12, [McKee \(2011\)](#) (D5) com 14 e [Reeves et al. \(2017\)](#) (F1) com 13 citações.

TABELA 4. Dinâmica da revisão sistemática dos artigos de acordo com as referências bibliográficas, citações e trabalhos desenvolvidos pelos autores

Modelos	Autor	Referência bibliográfica		Citações		Trab. Desenv.
		Intervalo	Qty.	Intervalo	Qty.	
A- Dinâmica de Populações e modelos Ecológicos	A8-Liang et al. (2016)	1973  2014	28	2018  2024	17	8
	A9-Linacre and Thompson (2004)	1986  2003	25	2005  2016	14	4
	A1-Allen-Perkins & Estrada (2019)	1972  2018	79	2020  2025	12	4
	A17-Yemshanov et al. (2011)	1973  2009	53	2012  2020	8	14
	A7-Leal-Ramírez et al. (2015)	1798  2009	23	2020  2024	6	8
	A5-Herskowitz et al. (2023)	1927  2023	63	2024  2025	3	3
	A4-Gonthier et al. (2023).	1917  2023	47	2023  2025	4	5
	A16-Yadav et al. (2024)	1978  2024	45	2024  2025	2	4
	A11-Qin et al. (2023)	1972  2021	31	2024  2025	2	3
	A12-Qiu et al. (2024)	1993  2021	27	2025	1	3
	A3-Gatwiri et al. (2024)	1992  2022	44		0	4

	A2-Dos Anjos et al. (2023).	1969  2021	48		0	3
	A6-Huang et al. (2023)	2002  2022	26		0	3
	A13-Raezah et al. (2024).	1975  2023	29		0	3
	A14-Suganya et al. (2024)	1997  2022	20		0	3
	A15-Trujillo-Salazar et al. (2024)	1988  2023	34		0	3
	A10-Mwasunda and Mwambala (2025)	1968  2023	31		0	2
B- Modelos Econométricos	B12-Shankar and Thirtle (2005)	1968  2003	23	2005  2025	87	4
	B2-Atallah et al. (2018).	1986  2017	54	2018  2025	27	6
	B6-Dharmaraja et al. (2020)	1925  2017	16	2020  2025	20	8
	B5-Cons Müller et al. (2010)	1993  2010	23	2011  2025	20	6
	B13-Skevas et al. (2014)	1991  2014	34	2015  2022	17	13
	B1-Afidchao et al. (2014)	1973  2014	45	2017  2024	14	10
	B11-Schumacher et al. (2006)	1970  2002	38	2007  2025	12	6
	B8-Liu et al. (2015)	1964  2014	26	2017  2024	7	10
	B4-Campos et al. (2022)	1999  2022	75	2023  2025	7	10
	B10-Régnier et al. (2023)	1932  2022	109	2023  2025	6	4
	B3-Brown et al. (2021)	1978  2020	62	2021  2022	2	8
C- Controle ótimo e princípio de Pontryagin	B9-Pérez Marulanda y Giralbo Sánchez (2020)	1949  2019	60	2024	1	7
	B7-Hall and Buncan (1984)	1932  1984	23		0	2
	C12-Zhang and Swinton (2009).	1925  2008	58	2009  2025	82	4
	C3-Chowdhury et al. (2019)	1962  2019	33	2019  2025	49	11
	C2-Alemneh et al. (2021)	1976  2021	31	2022  2025	29	6
	C5-Ghosh and Bhattacharya (2010)	1967  2007	30	2010  2025	23	4
	C4-Fotso Fotso et al. (2021)	1962  2020	44	2022  2025	11	14
	C9-Molter et al. (2023)	1959  2022	34	2024  2025	7	5
	C6-Hong et al. (2019)	1971  2018	41	2021  2024	6	10
	C10-Zevika et al. (2024)	1937  2023	49	2024  2025	6	6
	C1-Abaraya Abawari et al. (2023)	1976  2022	44	2023  2025	6	
D- Modelos Bioeconomia e otimização dinâmica	C8-Melese (2023)	1961  2022	41	2024  2025	3	1
	C11-Zevika et al. (2024)	1937  2024	51	2025	1	8
	C7-Kundu and Mallick (2024)	1962  2024	31		0	2
	D4-Marten and Moore (2011)	1974  2011	37	2012  2025	44	4
	D6-McKee et al. (2009)	1982  2007	30	2013  2021	14	11
	D3-Cook and Broughton (2023)	1997  2022	39	2023  2025	12	2
	D9-Yang et al. (2016)	1925  2012	40	2017  2022	9	8
	D5-McKee (2011)	1976  2009	35	2012  2023	7	2
	D2-Catarino et al. (2016).	1959  2015	122	2019  2021	6	10
	D1-Catarino et al. (2019).	1967  2018	86	2021	4	8
	D7-Parry (2022).	1959  2021	66	2024	4	1
E- Equações Diferenciais com atraso, estabilidade dinâmica e métodos numéricos	D8-Qin et al. (2022)	1965  2022	49	2024	2	22
	E1-Al Basir et al. (2019)	1977  2018	52	2019  2026	54	7
	E2-Al Basir et al. (2023)	1976  2022	48	2023  2025	5	3
	E3-Anwar et al. (2023)	1925  2023	73	2024  2025	4	5
	E4-Bhagat and Kumar (2023)	1966  2022	49	2024  2025	4	2
	E5-Hopper (2023)	1959  2021	100	2024  2025	3	1
	E6-Monteiro et al. (2024)	1989  2023	47	2024	1	3
F- Teoria dos jogos e Economia do comportamento	F1-Reeves et al. (2017)	1992  2015	27	2018  2025	13	6

De acordo com os principais artigos citados, cinco estudos se destacam pelo seu alto impacto: **Shankar e Thirtle (2005)** (B12) com 87 citações, **Chowdhury et al. (2019)** (C3) com 49, **Zhang e Swinton (2009)** (C12) com 82, **Al Basir et al. (2019)** (E1) com 54 e **Marten e Moore (2011)** (D4) com 44 citações. A maioria recebeu inúmeras citações nos últimos cinco anos, com exceção de B12, o que sugere uma crescente relevância desses modelos. Artigos recentes (2019-2025) com potencial de citação também foram identificados, contrastando com o caso atípico de **Hall e Buncan (1984)** (B7), que não recebeu citações em 41 anos.

Em relação aos padrões de colaboração científica, a análise da coautoria revela que os Modelos A e E apresentam menor colaboração, com exceção de **Yemshanov et al. (2011)** (A17), que possuem 14 trabalhos em conjunto. Os autores do Modelo B mostram variabilidade: **Afidchao et al. (2014)** (B1), **Campos et al. (2022)** (B4) e **Liu et al. (2015)** (B8) com 10 artigos cada, e **Skevas et al. (2014)** (B13) com 13, enquanto os demais variam de 2 a 8 colaborações. Um padrão semelhante é observado no Modelo C, onde **Chowdhury et al. (2019)** (C3) registram 11 artigos, **Fotso Fotso et al. (2021)** (C4) 14 e **Hong et al. (2019)** (C6) 10,

contrastando com os autores que apresentam de 1 a 8 colaborações. Os modelos D e E mostram casos notáveis, como [Catarino et al. \(2016\)](#) (D2) com 10 artigos, [McKee et al. \(2009\)](#) (D6) com 11 e [Qin et al. \(2022\)](#) (D8) com 22 colaborações, sendo este último o máximo registrado. Em contraste, [Melese \(2023\)](#) (C8), [Parry \(2022\)](#) (D7) e [Hopper \(2023\)](#) (E5) apresentam apenas 1 trabalho em coautoria.

TABELA 5. Comparação da contagem de citações entre referências seminais e recentes por modelo teórico: Médias e teste de Kruskal-Wallis para diferenças entre medianas.

Modelos	Média		Mediana	
	Primeira	Último	Primeira	Último
A-Dinâmica de Populações e modelos Ecológicos	1162	355	133	38
B-Modelos econométricos	2170	2122	122	28
C-Controle ótimo e princípio de Pontryagin	2023	75	122	25
D-Modelos bioeconômicos e otimização dinâmica	1039	66	221	49
E-Equações diferenciais com atraso, estabilidade dinâmica e métodos numéricos	1947	86	144	71
F-Teoria dos jogos e economia comportamental	1017	19	1017	19
Global	1616	561	154	34
Teste de Kruskal-Wallis (gl = 5)	-	-	0,8204	1,2382
Valor-p	-	-	0,9757	0,9412

p < 0.01, ** p < 0.05, * p < 0.10

De acordo com os valores médios apresentados na Tabela 4, o Modelo B (Modelos Econométricos) apresenta o maior número de citações tanto em referências seminais (2170 citações) quanto em referências recentes (2122 citações). Esse desempenho na literatura recente posiciona o Modelo B como o único que supera significativamente a média global (561 citações), destacando-o dos demais modelos teóricos. Os altos valores nas referências seminais são explicados principalmente pelos trabalhos de [Afidchao et al. \(2014\)](#) (B1), [Atallah et al. \(2018\)](#) (B2), [Brown et al. \(2021\)](#) (B3), [Liu et al. \(2015\)](#) (B8) e [Pérez Marulanda e Giralbo Sánchez \(2020\)](#) (B9), enquanto o valor nas referências recentes é predominantemente impulsionado por [Régner et al. \(2023\)](#) (B10). Da mesma forma, os modelos C (2023 citações) e E (1947 citações) também registram médias de citações seminais acima do valor global (1616 citações).

Embora as medianas mostrem uma dispersão numérica considerável entre os modelos, com valores particularmente elevados nas referências seminais para os Modelos D (221) e F (1017), e nas recentes para os Modelos A (38), D (49) e E (71) em comparação com a mediana geral (34), o teste de Kruskal-Wallis não detectou diferenças estatisticamente significativas entre as medianas dos grupos. Os resultados do teste, $\chi^2(5) = 0,8204$, p = 0,9757 para as referências seminais e $\chi^2(5) = 1,2382$, p = 0,9412 para as recentes (ambos p > 0,05), indicam que a distribuição das citações recebidas é homogênea entre os diferentes modelos teóricos. Isso sugere que, de uma perspectiva metodológica, a influência medida por meio de citações não varia significativamente dependendo da abordagem de pesquisa.

TABELA 6. Análise de correspondências bibliográficas de artigos de revisão por modelos

Modelos	Intervalo	Média	Mediana	Teste KW
A-Dinâmica de Populações e modelos Ecológicos	70-960	525	531	χ^2 (gl = 5) = 1,8781
B-Modelos econométricos	29-2271	654	556	
C-Controle ótimo e princípio de Pontryagin	50-1323	450	293	
D-Modelos bioeconômicos e otimização dinâmica	213-1855	787	531	p = 0,8657
E- Equações diferenciais com atraso, estabilidade dinâmica e métodos numéricos	67-608	338	338	
F-Teoria dos jogos e economia comportamental		458	458	
Total	29-2271	586	458	-

A Tabela 5 detalha a distribuição das coincidências bibliográficas entre os artigos revisados, agrupados por modelo teórico. Observa-se uma variação substancial nos valores médios, que variam de 338 (Modelo E) a 787 (Modelo D) coincidências. Os modelos B (Econométrico) e D (Bioeconômico) apresentam as médias mais elevadas (654 e 787, respectivamente), superando a média global de 586. Esses valores elevados são impulsionados principalmente pelos trabalhos de [Atallah et al. \(2018\)](#) e [Shankar e Thirtle \(2005\)](#) para o Modelo B, e por [Marten e Moore \(2011\)](#) e [Yang et al. \(2016\)](#) para o Modelo D. Em contrapartida, os modelos A, C, E e F registram médias abaixo do total global.

A mediana, uma medida mais robusta contra valores extremos, mostra uma distribuição ligeiramente diferente, com um valor geral de 458. Apesar dessas disparidades descritivas, o teste de Kruskal-Wallis não mostrou diferenças estatisticamente significativas na distribuição de correspondências bibliográficas entre os modelos ($\chi^2(5) = 1,8781$; $p = 0,8657$).

Este resultado sugere que, embora existam variações numéricas, a magnitude das coincidências bibliográficas é estatisticamente homogênea entre as diferentes abordagens metodológicas. Essa homogeneidade aponta para a existência de um corpus teórico fundamental compartilhado, no qual os diversos modelos se baseiam em um conjunto comum de literatura seminal. Essa constatação reforça a solidez teórica transversal que sustenta o campo de estudo, indicando que os artigos são construídos sobre uma base bibliográfica consolidada e consistentemente reconhecida.

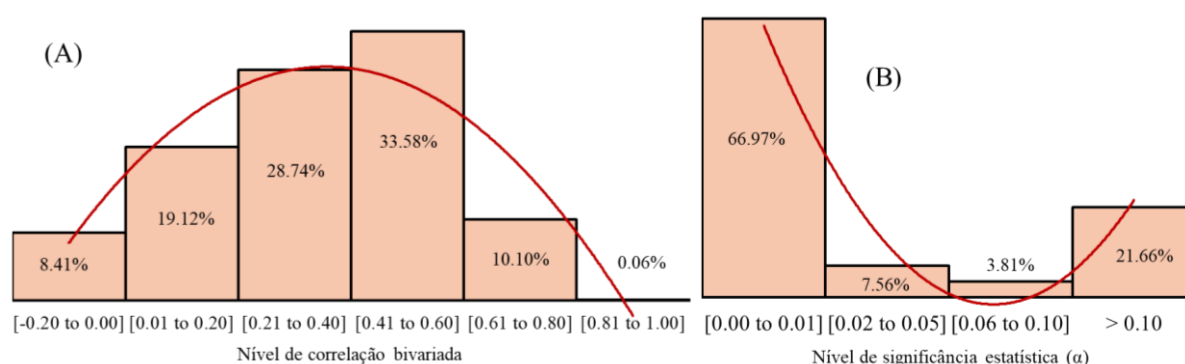


FIGURA 10. Correlação de Spearman entre a idade das referências bibliográficas (A) e sua significância estatística (B) em artigos científicos.

A análise de correlações bivariadas revela que 8,41% das relações entre as referências bibliográficas são negativas (-0,20 a -0,01) ou nulas (0,00), conforme a Figura 5A. Essas correlações negativas são observadas predominantemente entre a obra de Hall e Buncan (1984) (B7) e outras referências, exceto aquelas associadas aos códigos A7, B10, B12, C3, C5, C6, C7, C12 e E1. Além disso, foram identificados nove pares específicos sem qualquer correlação (A4-A7, A7-A10, A7-B6, A9-C2, A9-E3, A10-D9, A17-C7, C1-C12 e C5-E6). Cabe ressaltar que a maioria dessas correlações negativas não apresenta significância estatística ($p > 0,10$), como confirmado na Figura 5B.

Em contraste, as correlações positivas (0,01 a 0,85) representam a maioria dos casos, com uma distribuição percentual particularmente relevante nos intervalos de 0,41 a 0,60 (33,58%) e de 0,61 a 0,80 (28,74%). Os valores mais baixos (0,01 a 0,20) correspondem a 19,12% do total, enquanto as correlações mais fortes (0,81 a 1,00) são excepcionais, representando apenas 0,06%. O teste de significância estatística (Figura 5B) mostra que 66,97% das correlações são significativas com $p < 0,01$ (variação: 0,24 a 0,85). Por outro lado, 7,56% apresentaram significância com $p < 0,05$ (valores absolutos entre 0,18 e 0,23) e 3,81% com $p < 0,10$ (0,19 a 0,22).

Estes resultados apresentam uma correlação altamente significativa que destaca as relações intra-fator; por exemplo, A1 com A2, A8, A12 e A16, um padrão que se repete nos Modelos B, C, D e F. Da mesma forma, observam-se correlações inter-fator, como A16 com B2 e B3; D8 com E2, E5 e E6; e E6 com F1, entre várias outras conexões entre os Modelos D, E e F. O Modelo B atua como um nexo correlacional central, conectando-se com os Modelos A, C, D, E e F. Esses achados indicam que a maioria dos autores cita conjuntos semelhantes de referências, apresenta uma tendência acentuada a citar trabalhos contemporâneos e reflete padrões de citação com uma base bibliográfica coerente e compartilhada, o que valida metodologicamente a revisão sistemática realizada. A consistência nessas correlações significativas reforça a confiabilidade das análises, demonstrando o uso sistemático de fontes integradas na literatura examinada.

3.4. Avaliando a obsolescência científica de artigos de revisão

A Figura 6 revela resultados significativos sobre a obsolescência das referências bibliográficas nos diferentes modelos de pesquisa. Foram identificados quatro casos atípicos notáveis com mais de 80 anos de obsolescência: [Gonthier et al. \(2023\)](#) (A4) com 100 anos, [Herskowitz et al. \(2023\)](#) (A5) com 85 anos, [Leal-Ramírez et al. \(2015\)](#) (A7) com 189 anos e [Anwar et al. \(2023\)](#) (E3) com 96 anos. Esses casos demonstram a excepcional persistência de certas referências fundamentais na literatura científica.

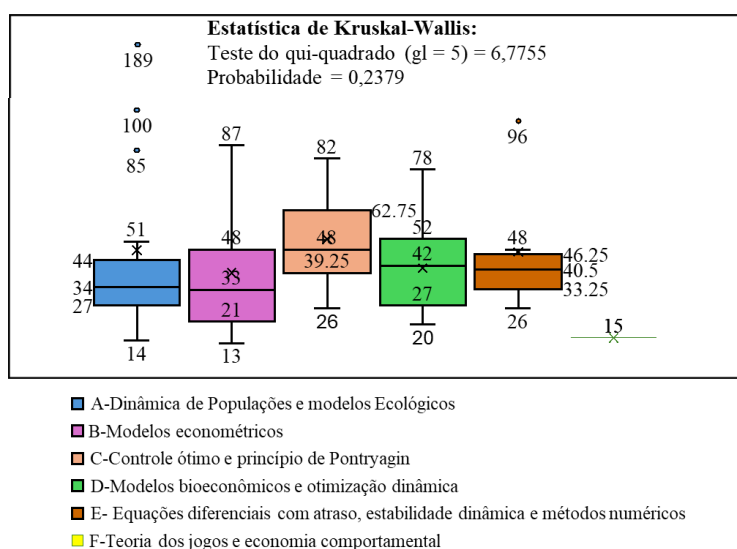


FIGURA 11. Índice de obsolescência de artigos científicos e teste não paramétrico de acordo com o modelo

Ao comparar os modelos, observa-se que os Modelos A e E apresentam distribuições mais homogêneas, com faixas de obsolescência entre 14-51 anos e 26-48 anos, respectivamente. O Modelo B mostra um comportamento similar na maioria dos seus artigos (13-48 anos), com três exceções na faixa de 49-87 anos. O Modelo D segue um padrão comparável, concentrando-se entre 20 e 52 anos, com dois valores atípicos de 54 e 78 anos. Em contrapartida, o Modelo C exibe a maior amplitude (26-82 anos), destacando-se por apresentar as referências mais antigas.

Na análise por quartis, os Modelos A, B e D apresentam distribuições semelhantes no primeiro quartil (Q1), com intervalos de obsolescência de 14 a 27, 13 a 21 e 20 a 27 anos, respectivamente. Essa semelhança se estende ao segundo quartil (Q2), onde os Modelos A e B registram valores máximos de 34 e 33 anos, dentro dos intervalos de 17 a 34 e de 21 a 33 anos.

No terceiro quartil (Q3), ambos os modelos mantêm uma tendência comparável, com intervalos de 33 a 44 anos (Modelo A) e de 33 a 48 anos (Modelo B).

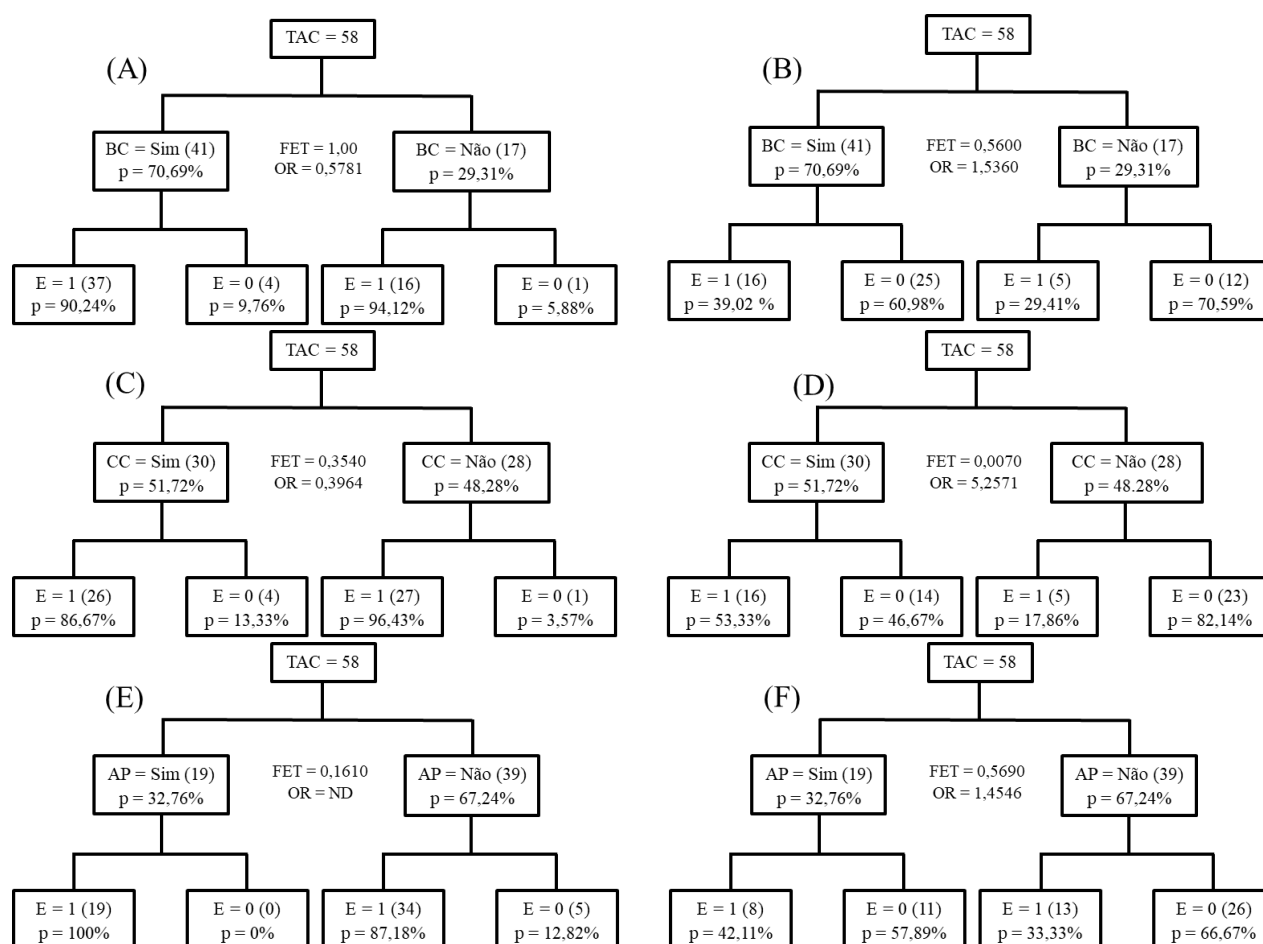
Em contraste, o Modelo C exibe uma distribuição distinta, com valores de obsolescência significativamente mais altos. Seus quartis abrangem intervalos mais amplos: 26–39,25 anos (Q1), 39–48 anos (Q2) e 48–62,75 anos (Q3). Por outro lado, o Modelo E mostra uma distribuição mais compacta e recente, com intervalos de 26–33,25 anos (Q1), 33,25–40,5 anos (Q2) e 40,5–46,25 anos (Q3).

Ao contrário do observado no teste de Kruskal-Wallis, a análise das medianas não revelou diferenças estatisticamente significativas. Isso é confirmado pelo teste χ^2 , que apresentou um valor de 6,7755 com gl = 5 e um valor p de 0,2379. Dado que esse resultado excede o nível de significância de 5% ($p > 0,05$), a hipótese nula não é rejeitada, indicando que as diferenças nas medianas entre os modelos utilizados não são estatisticamente relevantes na obsolescência contida nos artigos científicos.

Esses resultados permitem identificar padrões temporais no uso de referências bibliográficas com base nas abordagens metodológicas analisadas. Eles destacam diferenças na validade da literatura científica e sua relação com as práticas de citação entre os artigos.

3.5. Análise quantitativa de artigos de revisão usando inferência Bayesiana, teste exato de Fisher e OR

A Figura 7 mostra a extração de resultados de artigos de revisão sistemática sobre medidas de controle de pragas em culturas agrícolas e seus efeitos sobre a renda/lucros e os custos de controle.



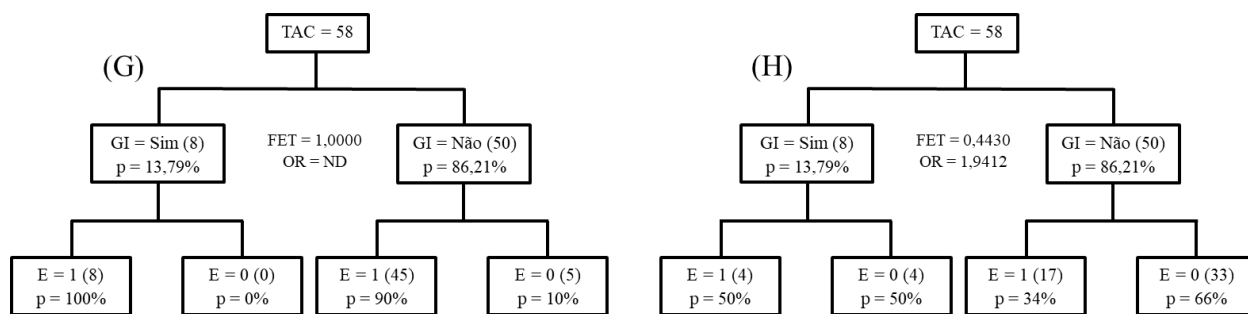


FIGURA 12. Efeitos do BC na receita/lucro (A) e nos custos (B), efeitos do QC na receita/lucro (C) e nos custos (D), impacto do AP na receita/lucro (E) e nos custos (F), efeitos do GI na receita/lucro (G) e nos custos (H) de acordo com FET e OR

3.5.1. Controle biológico (CB):

Os resultados apresentados nas Figuras 7A e 7B indicam que a maioria dos artigos analisados utiliza controle biológico (CB), com uma probabilidade de uso de 70,69%, em comparação com 29,31% que não o implementam. Tanto o uso quanto a ausência de CB demonstraram um alto impacto na melhoria da receita/lucro, com probabilidades de 90,24% e 94,12%, respectivamente (Figura 7A). No entanto, sua contribuição para a redução dos custos de controle foi limitada, com probabilidades de 39,02% (com CB) e 29,41% (sem CB) (Figura 7B). Além disso, observou-se que: a probabilidade conjunta de usar CB e melhorar a receita foi de 63,79%, a probabilidade de não usar CB e não melhorar a receita atingiu 27,59% e a possibilidade de usar CB e reduzir custos foi de 27,59%. Em comparação, o custo de não utilizá-lo e a redução das despesas foram de 8,62%.

O teste exato de Fisher apresentou valores de $FET = 1,00$ ($p > 0,05$) para receitas e $FET = 0,56$ ($p > 0,05$) para custos, indicando independência estatística entre o uso do BC e ambos os parâmetros. A OR mostrou uma menor probabilidade de aumento da receita com o uso do BC ($OR = 0,5781$) e uma maior probabilidade de redução de custos ($OR = 1,5360$), embora sem significância estatística ($p > 0,05$).

3.5.2 Controle Químico (CC):

Os dados revelam que 51,72% dos artigos utilizam controle químico (CC), em comparação com 48,28% que não o utilizam (Figuras 7C e 7D). É importante notar que tanto o uso quanto a omissão do CC estiveram associados a altas probabilidades de aumento da receita (86,67% e 96,43%, respectivamente; Figura 7C), enquanto a redução de custos foi mais provável com o uso do CC (53,33%) do que com sua omissão (17,86%; Figura 7D). As probabilidades conjuntas foram: 44,83% para uso de CQ e aumento da receita, 46,55% para não uso de CQ e aumento da receita, 27,59% para uso de CQ e redução de custos e 8,62% para não uso de CQ e redução de custos.

O teste exato de Fisher não mostrou associação entre WC e renda ($FET = 0,3540$; $p > 0,20$; Figura 7C); enquanto há uma associação muito forte entre CC e custos a 1% ($FET = 0,0070$; $p < 0,01$; Figura 7D). A OR indicou uma menor probabilidade de aumento da renda com o uso de CC ($OR = 0,3964$), sem significância estatística ($p > 0,05$), mas uma maior probabilidade de redução de custos ($OR = 5,2571$; $p < 0,01$).

3.5.3 Práticas Agrícolas (PA):

32,76% dos artigos relataram a implementação de práticas agrícolas (PA), em comparação com 67,24% que não as aplicaram (Figuras 7E e 7F). É importante destacar que a adoção de PA apresentou 100% de probabilidade de melhorar a receita (Figura 7E), enquanto seu impacto na redução de custos foi moderado (42,11% com PA vs. 33,33% sem PA; Figura 7F). As probabilidades conjuntas foram: 32,76% para implementar PA e melhorar a receita, 58,62%

para não implementar PA e melhorar a receita, 13,79% para implementar PA e reduzir custos e 22,41% para não implementar PA e reduzir custos.

O teste exato de Fisher sugeriu uma associação entre atividade física e renda com significância de 20% (FET = 0,1610; $p < 0,20$), mas não entre atividade física e custos (FET = 0,5690; $p > 0,05$). A razão de chances (OR) (1,4546) sugeriu uma maior probabilidade de redução de custos com a implementação de atividade física, embora sem significância estatística ($p > 0,05$).

3.5.4 Plantas com melhoramento genético (IG):

Apenas 13,79% dos artigos mencionaram o uso de plantas com Ingestão Diária Recomendada (IDR), em comparação com 86,21% que não o consideraram (Figuras 7G e 7H). O uso de IDR apresentou 100% de probabilidade de aumentar a renda (Figura 7G) e 50% de reduzir custos, em comparação com 34% na ausência de IDR (Figura 7H). As probabilidades conjuntas foram: 13,79% para o uso de IDR e aumento da renda, 77,59% para a não utilização de IDR e aumento da renda, 6,90% para o uso de IDR e redução de custos e 29,31% para a não utilização de IDR e redução de custos.

O teste exato de Fisher não mostrou associação entre IG e renda (FET = 1,00; $p > 0,05$) nem entre IG e custos (FET = 0,4430; $p > 0,05$). A OR (1,9412) sugeriu um efeito marcante na redução de custos com IG, mas sem significância estatística ($p > 0,05$).

4 DISCUSSÃO

Este estudo apresenta um mapeamento abrangente do campo da modelagem de culturas agrícolas para o controle de pragas por meio da integração de análises bibliométricas, sistemáticas e estatísticas. Os resultados delineiam a estrutura da comunidade científica envolvida, identificam suas questões mais relevantes e avaliam em profundidade a eficácia das estratégias de controle sob uma perspectiva bioeconômica. Consequentemente, a discussão se estrutura em torno de quatro eixos principais que emergem da integração dos resultados.

4.1 Estrutura e Fluxo da Colaboração Científica: De um Cenário Disperso a Núcleos Concentrados de Impacto

Ao analisar a coautoria, evidencia-se uma topologia de estudos com colaboração moderada, segmentados em grupos definidos, mas com distribuição heterogênea em termos de impacto científico. O estabelecimento dos quatro grupos principais, juntamente com a presença de autores autônomos extremamente produtivos, como "Chen Lansum", com 18 artigos e 774 citações (Figura 3A), sugere a coexistência de sólidas correntes de pensamento que fazem contribuições seminais e originais.

De acordo com a origem espacial dos autores, há uma marcada predominância de instituições localizadas na Suíça (clusters 1 e 2) e nos Estados Unidos (clusters 3 e 4), o que reflete padrões desiguais em nível global em termos de financiamento e desenvolvimento tecnológico. No entanto, a análise da Tabela 2 atenua essa constatação, apresentando uma produção científica mais diversificada, com contribuições notáveis da Índia (14,52%), China (6,45%) e Brasil (6,45%), evidenciadas, por exemplo, por [Monteiro et al. \(2024\)](#), [Qin et al. \(2022\)](#) e [Suganya et al. \(2024\)](#), respectivamente. Essa aparente contradição indica que, embora os núcleos de cooperação mais visíveis e citados estejam concentrados em países desenvolvidos, existe uma produção científica sólida e globalmente distribuída, especialmente em áreas como modelos de controle ótimo (Modelo C) e modelos de dinâmica populacional (Modelo A).

Entre os padrões de colaboração, a correlação entre coautoria e impacto científico não é direta. Isso porque autores como "Maire Nicolas", com três artigos e 111 citações, demonstram

que uma ampla cooperação com 19 coautores pode gerar um alto impacto. Da mesma forma, a presença de 63 autores sem citações não constitui um indicador confiável de relevância científica, apesar de suas publicações colaborativas. Por essa razão, destaca-se a necessidade de analisar a qualidade das redes de colaboração, transcendendo sua mera existência.

4.2 Evolução Temática: Dos Fundamentos Ecológicos ao Refinamento Bioeconômico

A coocorrência de palavras-chave (Figura 3B) revela claramente a evolução teórica da área de estudo. A posição central dos termos "Modelagem matemática" (com força de ligação de 2230), "Controle de pragas" (1666) e "Controle biológico" (1432) corrobora que o núcleo fundamental da pesquisa se situa na interseção entre a modelagem formal e o estudo de estratégias de controle.

A identificação de 7 agrupamentos de palavras demonstra uma maturação epistemológica da área, com eixos temáticos de pesquisa claramente diferenciados. É o caso das perspectivas teóricas e de simulação, representadas no agrupamento 2 por termos como "Bifurcação", "Modelagem matemática" e "Simulação computacional"; das perspectivas aplicadas e de gestão, no agrupamento 3, com palavras como "Impacto ambiental" e "Manejo integrado de pragas"; e das perspectivas de saúde pública, no agrupamento 5, com conceitos como "Mosquito", "Modelos estatísticos" e "Humanos", que estão diretamente ligados à especialização dos agrupamentos de coautoria previamente estabelecidos.

A presença de 104 palavras-chave de baixa frequência, como "Modelagem agrícola" e "Custo-benefício", indica nichos de pesquisa emergentes. Da mesma forma, quando essa descoberta é integrada à análise criptográfica descrita na Tabela 2, reflete-se a relevância desses tópicos para a bibliometria como áreas incipientes. Uma análise sistemática confirma que conceitos como "Custos de controle" (4C), conforme demonstrado no trabalho de [Molter et al. \(2023\)](#), e "Rentabilidade" (4F), corroborado por [Schumacher et al. \(2006\)](#), estão presentes nos objetivos dos trabalhos de modelagem mais recentes, especialmente nos Modelos de Controle Ótimo (C) e nos modelos econométricos (B). Isso revela uma transição da modelagem puramente ecológica para uma perspectiva de modelagem baseada em econometria que incorpora explicitamente a otimização de recursos.

4.3 Fundamentação teórica sólida e convergência metodológica: rumo a uma descrição bibliográfica abrangente

Uma das descobertas mais sólidas desta pesquisa é a existência de homogeneidade estatística nos padrões de citação e uma solidez na constituição teórica implícita. Embora haja uma disparidade metodológica, evidenciada nos seis modelos identificados (Modelo A a F), os valores do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis não mostram diferenças significativas nas medianas de citação apresentadas na Tabela 4, nem nas coincidências bibliográficas especificadas na Tabela 5. Isso indica que, independentemente de um estudo de pesquisa usar o Modelo B (modelos econométricos) ou o Modelo E (equações diferenciais), sua influência, quantificada por citações, e sua base bibliográfica fundamental são estatisticamente indistinguíveis.

Este resultado é de crucial importância, pois sugere uma convergência paradigmática. Consequentemente, a pesquisa não é realizada de forma isolada e independente, mas sim interconectada e influenciada mutuamente. Apesar da diversidade metodológica, elas se baseiam em um corpo comum de literatura seminal e são igualmente capazes de produzir pesquisas influentes. Nesse sentido, a análise de correlações bivariadas indica que 66,97% das relações foram positivas e estatisticamente significativas ($p < 0,01$), corroborando esse argumento com amplo e consistente suporte bibliográfico. O Modelo Econométrico (Modelo

B) serve como elo correlacional central, atuando como uma abordagem quantitativa apoiada por dados empíricos que conecta os diferentes tipos de modelagem.

4.4 Eficiência das estratégias de controle: a perspectiva bioeconômica

De acordo com a análise de inferência Bayesiana e o teste exato de Fisher representados na Figura 7, observa-se uma caracterização abrangente da área de estudo, permitindo uma avaliação rigorosa das estratégias de controle. Os resultados indicam que a eficácia não é equivalente à rentabilidade; embora tanto o Controle Biológico (CB) quanto o Controle de Custo (CC) revelem altas probabilidades ($> 85\%$) de aumento da receita, seu impacto na redução de custos é drasticamente diferente. Enquanto o CB não apresenta associação estatisticamente significativa com a redução de custos ($OR = 1,54$; $p > 0,05$), o CC demonstra uma associação robusta ($OR = 5,26$; $p < 0,01$). Isso gera uma dicotomia para o agricultor: por um lado, o CB aumenta a renda de forma sustentável, mas não reduz significativamente os custos; por outro lado, o CC melhora as receitas e reduz os custos significativamente, embora acarrete impactos ambientais negativos.

Da mesma forma, identifica-se um potencial em alternativas sustentáveis; as Parcerias Público-Privadas (PAs) e os Grupos de Interesse (GIs) demonstram uma capacidade notável, com probabilidades consistentes (100%) de melhoria das receitas após a sua implementação. Embora a sua associação com a redução de custos não tenha sido estatisticamente significativa ($p > 0,10$), a sua elevada eficácia no aumento dos lucros posiciona-os como estratégias essenciais para o fortalecimento sustentável. O facto de apenas $13,79\%$ dos artigos analisarem os GIs aponta para uma área pouco explorada, mas de enorme potencial.

Essas descobertas destacam a necessidade bioeconômica de desenvolver pesquisas de ponta que integrem a modelagem da dinâmica de pragas com a otimização de sistemas complexos, equilibrando a maximização da receita ou a minimização de custos com fatores ambientais, ecológicos e sociais. Os Modelos Bioeconômicos (Modelo D) e os Modelos de Controle Ótimo (Modelo C), que incorporam essa otimização, representam a fronteira mais desenvolvida dos estudos nessa área.

5 CONCLUSÕES

Como resultado da análise, identifica-se um contexto, sustentado por um sólido e subdividido corpus teórico, mas enriquecido por contribuições individuais e colaborativas diferenciadas. Chen Lansun destaca-se como um autor independente de alto impacto, com 18 artigos e 774 citações. Ao mesmo tempo, colaboradores como Maire Nicolas e Smith Thomas A. demonstram produtividade significativa em redes de coautoria. Em termos de distribuição geográfica, observa-se uma concentração institucional nos Estados Unidos e na Suíça, apesar da produção considerável e diversificada do Brasil, da China e da Índia.

Em relação às fontes teóricas, os Modelos Econométricos apresentam a maior média de citações em referências seminais e recentes, destacando-se os trabalhos de Dharmaraja et al. (2020), Atallah et al. (2018), Consmüller et al. (2010) e Shankar & Thirtle (2005). Da mesma forma, os Modelos de Controle Ótimo são representados por Chowdhury et al. (2019), Alemneh et al. (2021), Ghosh & Bhattacharya (2010) e Zhang & Swinton (2009). Os Modelos Bioeconômicos demonstram uma influência contínua e crescente, como observado por Marten & Moore (2011), e os Modelos de Equações Diferenciais por meio de Basir et al. (2019). A ausência de diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$) nas medianas de citações entre os modelos, conforme confirmado pelo teste de Kruskal-Wallis, indica uma base teórica e metodológica comum e robusta que transcende as abordagens individuais.

Em relação às limitações teóricas, identifica-se uma simplificação excessiva da complexidade do sistema, que não consegue capturar as interações ecológicas ao omitir

múltiplos fatores ambientais e assumir relações lineares e taxas constantes. As suposições sobre o comportamento humano são irrealistas, considerando grupos homogêneos em conhecimento, práticas e recursos econômicos e sociais. Além disso, o escopo das interações modeladas é limitado, pois se concentra no estudo de uma praga ou cultura específica, ignorando outras espécies, doenças e práticas agrícolas. Também não considera a evolução da resistência nem internaliza custos sociais e ambientais externos, como poluição e perda de biodiversidade.

Em relação às limitações empíricas, diversos artigos carecem de validação empírica por se basearem exclusivamente em simulações teóricas. Da mesma forma, alguns estudos utilizam dados secundários obtidos da literatura científica que não se adequam ao contexto analisado devido à sua imprecisão e desatualização. Outros utilizam dados primários, mas são enviesados pela percepção subjetiva dos agricultores, por amostras insuficientes ou por dados meteorológicos de um único ponto. Questões de generalização e aplicabilidade também são identificadas, uma vez que os modelos são frequentemente desenvolvidos para áreas específicas e seus resultados se baseiam em horizontes temporais curtos, sem abordar dinâmicas de longo prazo. Por fim, existem barreiras práticas à implementação, visto que os modelos não incorporam restrições econômicas e logísticas reais, como os altos custos de implementação e o acesso dos agricultores ao financiamento. Similarmente, o controle biológico, embora teoricamente ótimo, enfrenta desafios práticos em termos de regulamentação, aceitação e disponibilidade de recursos.

Em relação às lacunas na literatura, observam-se lacunas metodológicas devido à predominância de estudos de séries temporais e abordagens quantitativas, em detrimento de pesquisas qualitativas e estudos com dados em painel que poderiam capturar a heterogeneidade e os comportamentos transversais. Há também lacunas temáticas, evidenciadas pela desconexão entre as oportunidades identificadas e as pesquisas realizadas; por exemplo, a análise bayesiana indica que práticas de melhoramento genético e agrícolas têm alta probabilidade de aumentar a renda, mas são as menos estudadas. Além disso, identificam-se lacunas geográficas e de colaboração, refletidas nos 63 autores não citados. Isso sugere problemas de integração em redes globais de conhecimento ou restrições à visibilidade de pesquisas geradas em determinadas regiões.

As futuras linhas de pesquisa devem integrar variáveis mais realistas à modelagem bioeconômica, considerando o comportamento humano diante do risco, custos de transação, serviços ecossistêmicos, produtividade agrícola, preços de mercado, renda líquida e fatores físicos, biológicos e ambientais. Para aprofundar o controle de pragas em culturas agrícolas, é necessário incorporar estratégias como melhoramento genético de plantas, práticas agrícolas e controle integrado (biológico, químico e mecânico), utilizando delineamentos de dados em painel para avaliar seu impacto a longo prazo em diferentes contextos. Recomenda-se também o desenvolvimento de pesquisas utilizando métodos mistos, combinando modelagem quantitativa com abordagens qualitativas para compreender as barreiras à adoção de estratégias de controle, um aspecto que merece maior atenção. Por fim, é crucial reduzir as lacunas de colaboração, promovendo redes de pesquisa mais inclusivas, incorporando autores e regiões sub-representados e aproveitando a força do corpus teórico amplamente validado.

A pesquisa desenvolvida oferece uma visão abrangente, mas apresenta limitações inerentes. O uso exclusivo da base de dados Scopus para a revisão sistemática pode ter omitido literatura relevante publicada em periódicos não indexados no Scopus ou em outros idiomas. Da mesma forma, o uso do Research Rabbit como ferramenta de apoio é limitado pela acessibilidade digital das referências completas, o que pode enviesar o mapeamento das redes de literatura. No entanto, essa limitação foi amplamente mitigada pela revisão complementar na plataforma Scopus. Por fim, a análise sistemática utilizando criptografia envolve certo grau

de interpretação por parte dos pesquisadores, o que introduz elementos subjetivos na classificação dos artigos. Pesquisas futuras poderiam superar essas limitações analisando múltiplas bases de dados e incorporando técnicas de processamento de linguagem natural para otimizar e ampliar a análise de conteúdo.

REFERÊNCIAS

- Abaraya-Abawari, M., L. Lemecha-Obsu., and A. Shiferaw-Melese. 2023. Optimal control analysis of coffee berry borer infestation in the presence of farmer's awareness. *Applied Mathematics in Science and Engineering*, 31(1), 1–24. <https://doi.org/10.1080/27690911.2023.2169684>
- Afidchao, M. M., C. J. M. Musters., A. Wossink., O. F. Balderama., and G. R. De Snoo. 2014. Analysing the farm level economic impact of GM corn in the Philippines. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 70, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2014.05.008>
- Al Basir, F., A. Banerjee., and S. Ray. 2019. Role of farming awareness in crop pest management - A mathematical model. *Journal of Theoretical Biology*, 461, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.10.043>
- Al Basir, F., S. Samanta., and P. K. Tiwari. 2023. Bistability, Generalized and Zero-Hopf Bifurcations in a Pest Control Model With Farming Awareness. *Journal of Biological Systems*, 31(1), 115–140. <https://doi.org/10.1142/S0218339023500079>
- Alemneh, H. T., A. S. Kassa., and A. A. Godana. 2021. An optimal control model with cost effectiveness analysis of Maize streak virus disease in maize plant. *Infectious Disease Modelling*, 6, 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.12.001>
- Allen-Perkins, A., and E. Estrada. 2019. Mathematical modelling for sustainable aphid control in agriculture via intercropping. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 475(2226), 1–19. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0136>
- Anwar, N., I. Ahmad., A. K. Kiani., M. Shoaib., and M. A. Z. Raja. 2023. Numerical treatment for mathematical model of farming awareness in crop pest management. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 9(1208774), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fams.2023.1208774>
- Atallah, S. S., M. I. Gómez., and J. Jaramillo. 2018. A Bioeconomic Model of Ecosystem Services Provision: Coffee Berry Borer and Shade-grown Coffee in Colombia. *Ecological Economics*, 144(August 2017), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.002>
- Bhagat, M., and D. Kumar. 2023. Stability analysis of mathematical model for spread of pest in tea plant by RKM-4 and ABM-2. *Journal of Difference Equations and Applications*, 29(2), 121–142. <https://doi.org/10.1080/10236198.2023.2181026>
- Breslow, N. (1981). Odds ratio estimators when the data are sparse. *Biometrika*, 68(1), 73–84. <https://doi.org/10.1093/biomet/68.1.73>
- Brown, Z. S., L. Connor., R. M. Rejesus., and J. M. Yorobe. 2021. Landscape-level feedbacks in the demand for transgenic pesticidal corn in the Philippines. *Ecological Economics*, 180(106883), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106883>
- Campos, J. C., J. Manrique-Silupú., B. Dorneanu., W. Ipanaqué, and H. Arellano-García. 2022. A smart decision framework for the prediction of thrips incidence in organic banana crops. *Ecological Modelling*, 473(110147), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110147>

- Catarino, R., F. Areal., J. Park., and N. Parisey. 2019. Spatially explicit economic effects of non-susceptible pests' invasion on Bt maize. *Agricultural Systems*, 175, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.05.008>
- Catarino, R., G. Ceddia., F. Areal., N. Parisey., and J. Park. 2016. Managing maize under pest species competition: Is Bt (*Bacillus thuringiensis*) maize the solution? *Ecosphere*, 7(6), 1–19. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1340>
- Chowdhury, J., F. Al Basir., Y. Takeuchi., M. Ghosh., and P. K. Roy. 2019. A mathematical model for pest management in *Jatropha curcas* with integrated pesticides - An optimal control approach. *Ecological Complexity*, 37, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2018.12.004>
- Consmüller, N., V. Beckmann., and M. Petrick. 2010. An econometric analysis of regional adoption patterns of Bt maize in Germany. *Agricultural Economics*, 41(3–4), 275–284. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2010.00439.x>
- Cook, D. C., and S. Broughton. 2023. Economic impact of polyphagous shot hole borer *Euwallacea fornicatus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in Western Australia. *Agricultural and Forest Entomology*, 25(3), 449–457. <https://doi.org/10.1111/afe.12566>
- Dharmaraja, S., V. Jain., P. Anjoy., and H. Chandra. 2020. Empirical Analysis for Crop Yield Forecasting in India. *Agricultural Research*, 9(1), 132–138. <https://doi.org/10.1007/s40003-019-00413-x>
- Dos Anjos, L., I. D. Weber., and W. A. C. Godoy. 2023. Modelling the biocontrol of *Spodoptera frugiperda*: A mechanistic approach considering Bt crops and oviposition behaviour. *Ecological Modelling*, 484(August), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110490>
- Fotso-Fotso, Y., S. Touzeau., T. Berge., S. Bowong., and F. Grogard. 2021. Modelling and optimal strategy to control coffee berry borer. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 44(18), 14569–14592. <https://doi.org/10.1002/mma.7726>
- Fu, Y. X., and J. Arnold. 1992. A Table of Exact Sample Sizes for Use with Fisher's Exact Test for 2 x 2 Tables. *Biometrics*, 48(4), 1103–1112. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2532702>
- Gatwiri, M. B., M. Ronoh., C. G. Ngari., and D. M. Kitavi. 2024. Mathematical Modelling of Host-Pest Interaction in the Presence of Insecticides and Resistance: A Case of Fall Armyworm. *Journal of Mathematics*, 2024, 1–23. <https://doi.org/10.1155/2024/2886786>
- Ghosh, S., and D. K. Bhattacharya. 2010. Optimization in microbial pest control: An integrated approach. *Applied Mathematical Modelling*, 34(5), 1382–1395. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.08.026>
- Gonthier, J., J. Koller., J. Arnó., J. Collatz., and L. Sutter. 2023. Models for the practitioner: Predicting the efficient biocontrol of *Tuta absoluta* under different management scenarios. *Crop Protection*, 172(May), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106316>
- Haddaway, N. R., M. J. Page., C. C. Pritchard., and L. A. McGuinness. 2022. PRISMA 2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18(2), 1–12. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>

- Hall, D. C., and G. M. Duncan. 1984. Econometric evaluation of new technology with an application to integrated pest management. *American Journal of Agricultural Economics*, 66(5), 624–633. <https://doi.org/10.2307/1240969>
- Herskowitz, Y., S. Bunimovich-Mendrazitsky., and T. Lazebnik. 2023. Mathematical model of coffee tree's rust control using snails as biological agents. *BioSystems*, 229(104916), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2023.104916>
- Hong, Y. A., R. K. Gallardo., X. Fan., S. Atallah., and M. I. Gómez. 2019. Phytosanitary regulation on Washington apple producers under an apple maggot quarantine program. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 44(3), 646–663. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.292336>
- Hopper, K. R. 2023. Modeling the effects of plant resistance, herbivore virulence, and parasitism, on the population dynamics of aphids and parasitoids in wheat and soybean in different climates. *Ecological Modelling*, 481(110376), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110376>
- Huang, L., Y. Zhuang., and Q. Liu. 2023. A mathematical model study on plant root pest management. *AIMS Mathematics*, 8(4), 9965–9981. <https://doi.org/10.3934/math.2023504>
- Jabbour, C. J. C. 2013. Environmental training in organisations: From a literature review to a framework for future research. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.017>
- Kass, R. E., and A. E. Raftery. 1995. Bayes factors. *Journal of the American Statistical Association*, 90(430), 773–795. <https://doi.org/10.1080/01621459.1995.10476572>
- Kruskal, W. H., and W. A. Wallis. 1952. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Kundu, P., and U. K. Mallick. 2024. Optimal control analysis of a mathematical model for guava nutrients in an integrated farming with cost-effectiveness. *Results in Control and Optimization*, 17(November), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100490>
- Leal-Ramírez, C., O. Castillo., P. Melin., and H. Echavarría-Heras. 2015. A fuzzy cellular prey – predator model for pest control under sustainable bio-economic equilibrium : A formal description and simulation analysis study. *Applied Mathematical Modelling*, 39(7), 1794–1803. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.09.037>
- Levy, P. 1995. Charles Spearman's contributions to test theory. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 48(2), 221–235. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1995.tb01061.x>
- Liang, X., Y. Pei., M. Zhu., and Y. Lv. 2016. Multiple kinds of optimal impulse control strategies on plant-pest-predator model with eco-epidemiology. *Applied Mathematics and Computation*, 287–288, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.04.034>
- Linacre, N. A., and C. J. Thompson. 2004. Dynamics of insect resistance in Bt-corn. *Ecological Modelling*, 171(3), 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.08.009>
- Line, M. B., and A. Sandison. 1974. Progress in documentation "obsolescence" and changes in the use of literature with time. *Journal of Documentation*, 30(3), 283–350. <https://doi.org/10.1108/eb026835>

- Liu, Z., T. W. Griffin., T. L. Kirkpatrick., and W. S. Monfort. 2015. Spatial econometric approaches to developing site-specific nematode management strategies in cotton production. *Precision Agriculture*, 16(5), 587–600. <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9386-9>
- Marten, A. L., and C. C. Moore. 2011. An options based bioeconomic model for biological and chemical control of invasive species. *Ecological Economics*, 70(11), 2050–2061. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.05.022>
- McKee, G. J. 2011. Coordinated pest management decisions in the presence of management externalities: The case of greenhouse whitefly in California-grown strawberries. *Agricultural Systems*, 104(1), 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.10.005>
- McKee, G. J., R. E. Goodhue., F. G. Zalom., C. A. Carter., and J. A. Chalfant. 2009. Population dynamics and the economics of invasive species management: The greenhouse whitefly in California-grown strawberries. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 561–570. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.12.011>
- Melese, A. S. 2023. Mathematical model and optimal control analysis of coffee berry borer with temperature and rainfall variability. *International Journal of Biomathematics*, 17(5), 1–28. <https://doi.org/10.1142/S179352452350047X>
- Molter, A., J. I. M. Bezerra., E. Rafikova., D. E. Nava., and M. Rafikov. 2023. Dynamics and biological control of the sugarcane borer with two parasitoids. *Ecological Modelling*, 481(110371), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110371>
- Monteiro, L. H. A., F. C. Nonis., and R. Concilio. 2024. Biological pest control and crop–tree competition in agroforestry: a dynamical systems analysis. *Computational and Applied Mathematics*, 43(2), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s40314-024-02613-w>
- Mwasunda, J. A., and A. N. Mwambala. 2025. Modeling the impact of pheromone traps on the dynamics of fall armyworms: insights from maize biomass infestation. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02200-2>
- United Nations 2024. The Sustainable Development Goals Report. In *United Nations*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf>
- Parry, H. 2022. Economic benefits of conservation biocontrol: A spatially explicit bioeconomic model for insect pest management in agricultural landscapes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10(December), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.970624>
- Pérez-Marulanda, J. A., and C. E. Giraldo-Sánchez. 2020. Population parameters of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) and associated losses in greenhouse tomato. *Journal of Tropical Biology*, 68(4), 1025–1038. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i4.40898>
- Qin, H., W. Hong., Z. Qi., Y. Hu., R. Shi., S. Wang., Y. Wang., J. Zhou., D. Mu., J. Fu., and T. Sun. 2022. A Temperature-Dependent Model for Tritrophic Interactions Involving Tea Plants, Tea Green Leafhoppers and Natural Enemies. *Insects*, 13(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/insects13080686>
- Qin, W., Y. Xia., and Y. Yang. 2023. An eco-epidemic model for assessing the application of integrated pest management strategies. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 20(9), 16506–16527. <https://doi.org/10.3934/mbe.2023736>

- Qiu, G., Z. Yang., and B. Deng. 2024. Backward bifurcation of a plant virus dynamics model with nonlinear continuous and impulsive control. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 21(3), 4056–4084. <https://doi.org/10.3934/mbe.2024179>
- Raezah, A. A., J. Chowdhury., and F. A. Basir. 2024. Global stability of the interior equilibrium and the stability of Hopf bifurcating limit cycle in a model for crop pest control. *AIMS Mathematics*, 9(9), 24229–24246. <https://doi.org/10.3934/math.20241179>
- Reeves, T., H. Ohtsuki., and S. Fukui. 2017. Asymmetric public goods game cooperation through pest control. *Journal of Theoretical Biology*, 435, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2017.09.006>
- Régnier, B., J. Legrand., P. A. Calatayud., F. Rebaudo. 2023. Developmental Differentiations of Major Maize Stemborers Due to Global Warming in Temperate and Tropical Climates. *Insects*, 14(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/insects14010051>
- Schumacher, S. K., T. L. Marsh., and K. A. Williams. 2006. Optimal pest control in greenhouse production of ornamental crops. *Agricultural Economics*, 34(1), 39–50. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2006.00101.x>
- Shankar, B., and C. Thirtle. 2005. Pesticide productivity and transgenic cotton technology: The South African smallholder case. *Journal of Agricultural Economics*, 56(1), 97–116. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2005.tb00124.x>
- Skevas, T., S. M. Swinton., T. D. Meehan., T. N. Kim., C. Gratton., and A. Egbendewe-Mondzozo. 2014. Integrating agricultural pest biocontrol into forecasts of energy biomass production. *Ecological Economics*, 106, 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.07.027>
- Spearman, C. 1904. The Proof and Measurement of Association between Two Things Author (s) : C . Spearman Source: The American Journal of Psychology, Vol. 15 , No. 1 (Jan., 1904), pp. 72-101 Published by : University of Illinois Press Stable URL : <http://www.jstor.org>. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101.
- Suganya, G., E. Jenitta., and R. Senthamarai. 2024. A study on the dynamics of pest population with biocontrol using predator, parasite in presence of awareness. *Computer Research and Modeling*, 16(3), 713–729. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-3-713-729>
- Trujillo-Salazar, C. A., G. Olivar-Tost., and D. M. Sotelo-Castelblanco. 2024. Bifurcation Analysis in a Coffee Berry-Borer-and-Ants Prey–Predator Model. *Mathematics*, 12(11), 1–19. <https://doi.org/10.3390/math12111670>
- Yadav, A., R. Pandey., N. Jha., and A. K. Misra. 2024. Modeling the Effects of Pests and Pesticide on Crop Yields in a Multiple Cropping System. *Journal of Biological Systems*, 32(3), 1169–1201. <https://doi.org/10.1142/S0218339024500396>
- Yang, L., L. Elbakidze., T. Marsh., and C. McIntosh. 2016. Primary and secondary pest management in agriculture: balancing pesticides and natural enemies in potato production. *Agricultural Economics (United Kingdom)*, 47(6), 609–619. <https://doi.org/10.1111/agec.12259>
- Yemshanov, D., D. W. McKenney., P. de Groot., D. Haugen., J. Pedlar., D. Sidders., and B. Joss. 2011. A harvest failure approach to assess the threat from an invasive species. *Journal of Environmental Management*, 92(1), 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.002>

- Zevika, M., A. Triska., R. Kusdiantara., Y. Syukriyah., N. Fairusya., and I. Guswenrivo. 2024a. Dynamic analysis and optimal control strategies of a predator–prey mathematical model for the pest eradication in oil palm plantation. *Chaos, Solitons and Fractals*, 183(November 2023), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.114902>
- Zevika, M., S. Utami., B. Tjahjono., M. P. Sucahyono., A. Gafur., I. Guswenrivo., A. Triska., and S. K. Himmi. 2024b. Understanding population dynamics and management strategies for a newly emerging pest *Carea* sp. in Eucalyptus plantations in Indonesia through a mathematical model. *Chaos, Solitons and Fractals*, 188(April), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.115548>
- Zhang, W., and S. M. Swinton. 2009. Incorporating natural enemies in an economic threshold for dynamically optimal pest management. *Ecological Modelling*, 220(9–10), 1315–1324. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.01.027>

Artigo 3

Modelo bioeconômico para a produtividade da cana-de-açúcar: interações climáticas, agronômicas e populacional do *Sphenophorus levis*

Resumo

A presença de pragas nos cultivos agrícolas é um componente inerente ao ecossistema, com efeitos tanto positivos como negativos, sendo esses últimos críticos na redução da produtividade e viabilidade econômica, especialmente, na cultura canavieira cujas mudanças nos sistemas de produção têm apresentado novos desafios na gestão do manejo das pragas. O *Sphenophorus levis* tem sido desde o início da década de 2020 a praga de principal interesse econômico na cana-de-açúcar no Brasil. A literatura tem apresentado resultados controversos na modelagem do efeito do ataque do *S. levis* na produtividade da cana-de-açúcar, a partir de estudos com variáveis ambientais, biológicas e de manejo tratadas de forma isolada. Este estudo tem como objetivo apresentar um modelo bioeconômico, estruturado em duas análises de regressão, utilizando mínimos quadrados generalizados, que mensura inicialmente o dano do *S. levis* na cana-de-açúcar (toco atacado) considerando variáveis ambientais e a densidade populacional (larval, pupa e adultos), para em seguida mensurar o impacto dos danos causados pela praga na produtividade, agregando também variáveis ambientais e agronômicas, incluindo o manejo fitossanitário. Utilizou-se uma ampla base de dados com 2.772 pontos observados. Os resultados evidenciaram que a umidade relativa e a velocidade do vento impactaram a produtividade (-5,92% e -12,67%), mas aumentaram os danos da praga na cultura (+0,15 e +0,22 unidades). A temperatura, em mudança, reduziu o alcance do dano (-0,31 unidades). No modelo de produtividade, o manejo de pragas com uso de produtos químicos não resultou em aumento de produtividade (-1,20%) e os danos causados pela praga reduzem em 2,55% a cada toco atacado. Decisões agronômicas quanto a idade do canavial e o sistema mecânico de plantação, diminuíram a produtividade (-5,70% e -2,23%), enquanto o plantio de cana no primeiro semestre e um ambiente de produção mais favorável contribuem positivamente (+3,45% e +7,38%). Para o modelo de dano do *S. levis*, além dos fatores climáticos, as densidades populacionais da praga em todas as suas etapas mostram efeitos positivos (larva: +2,26, pupa: +2,13, adulto: +2,00 unidades). Os resultados deste estudo contribuem no processo de gestão da praga, bem como apresenta novas oportunidades de pesquisas empíricas para melhor entender o comportamento do inseto nos sistemas de produção da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Dano econômico, Manejo integrado de pragas, Sistemas de produção sustentável, Sucroenergético.

1. Introdução

A agricultura enfrenta o desafio imperativo de harmonizar a segurança alimentar com a sustentabilidade ambiental. Este esforço é fundamental para alcançar os objetivos do desenvolvimento sustentável Fome Zero (ODS 2) através de uma nutrição adequada para todos, e para garantir uma produção e um consumo responsável (ODS 12) através de uma gestão eficiente dos recursos e da redução de perdas. Além disso, há implicações diretas na ação climática (ODS 13), na conservação dos ecossistemas terrestres (ODS 15), no acesso à água limpa (ODS 6) e na promoção do trabalho decente (ODS 8), para garantir os rendimentos dos agricultores (Nações Unidas, 2024). Neste contexto, o manejo de pragas constitui um pilar crítico para alcançar esses objetivos (Hall e Duncan, 1984).

Os métodos de controle tradicionais, que dependem predominantemente de inseticidas químicos, demonstraram gerar externalidades negativas significativas, como a resistência das pragas, efeitos adversos sobre os inimigos naturais e a contaminação ambiental (Liu et al., 2015; Schumacher et al., 2006). Como resposta, o Manejo Integrado de Pragas (MIP) surgiu

como um paradigma alternativo que busca otimizar o controle por meio da combinação racional de diversas estratégias, priorizando o controle biológico, as práticas agronômicas e culturais, e reservando os produtos químicos como último recurso (Al Basir et al., 2023).

Dentro dos cultivos afetados, a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) enfrenta danos consideráveis causados pela *Sphenophorus levis*, uma praga de solo cujas larvas se alimentam do rizoma da planta, comprometendo o seu desenvolvimento e produtividade (Soares-Costa et al., 2011; Xavier et al., 2024). Sua biologia complexa e seus hábitos críticos dificultam o controle por meio de métodos convencionais, o que torna necessárias estratégias inovadoras e específicas (Barreto-Triana et al., 2014; Degaspari et al., 1987). Investigações recentes sobre *S. levis* foram exploradas por diversas vias para seu manejo, incluindo o controle biológico de nematodos entomopatógenos (Leite et al., 2023; Silva Oliveira et al., 2021), o desenvolvimento de cana de açúcar transgênico que expressa inibidores de proteasas (Fonseca et al., 2012; Schneider et al., 2017), a interferência de ARN (Mohan et al., 2021), o uso de feromonas (Zarbin et al., 2003) e a otimização de práticas culturais, como a limpeza de resíduos durante a colheita (De Castro et al., 2019; Rosa et al., 2024).

Paralelamente, o modelo bioeconômico e matemático foi consolidado como uma ferramenta fundamental para compreender a dinâmica populacional das pragas, avaliar a eficácia das estratégias de controle e otimizar as decisões de manejo a partir de uma perspectiva tanto ecológica quanto econômica (Catarino et al., 2019; Liang et al., 2016). Os modelos estocásticos e deterministas permitem simular cenários complexos, integrando variáveis como a adoção de práticas por parte do agricultor, as condições térmicas e as interações entre espécies, com o objetivo de projetar estratégias de controle ótimas (Anwar et al., 2023; Fotso Fotso et al., 2021; Régnier et al., 2023). Em particular, os modelos de controle ótimos, baseados no princípio de Pontryagin, permitem projetar intervenções que maximizem o rendimento do cultivo enquanto minimizam os custos e o impacto ambiental (Alemneh et al., 2021; Chowdhury et al., 2019). Essas abordagens foram demonstradas em sua utilização em diversos sistemas agrícolas, como o café (Fotso Fotso et al., 2021), o milho (Catarino et al., 2019; Gatwiri et al., 2024) e a cana-de-açúcar (Molter et al., 2023), destacando o potencial de combinação de controles biológicos e químicos (Ghosh e Bhattacharya, 2010; Liang et al., 2016).

No entanto, persiste uma lacuna significativa na integração de uma abordagem holística que combina o conhecimento detalhado da biologia e ecologia de *S. levis* evidenciado em estudos empíricos recentes com o poder preditivo e de otimização dos modelos bioeconômicos e matemáticos. A maior parte das investigações centra-se numa única tática de controle ou num mecanismo integrado específico (químico, biológico, cultural), sem quantificar as sinergias, os efeitos de substituição e os efeitos das estratégias combinadas com base em diversos cenários de infestação e condições edafoclimáticas.

Por isso, este estudo posiciona-se nesta lacuna a integração de variáveis associadas à dinâmica populacional *S. levis* em seus estágios de larva, pupa e adulto, considerando o manejo fitossanitário, o manejo agronômico e os fatores climáticos no cultivo de cana-de-açúcar. Desta forma, o objetivo principal é desenvolver um modelo bioeconômico de produtividade para o cultivo de cana-de-açúcar, em função de fatores climáticos, manejo fitossanitário e práticas agronômicas. Como um componente específico deste modelo, busca-se modelar a incidência de ataques de *S. levis* em função das variáveis climáticas e da dinâmica populacional da praga em seus estágios larval, pupal e adulto.

2. Metodologia

2.1. Área de estudo e fonte de dados

O estudo foi conduzido no estado de São Paulo, Brasil, principal região produtora de cana-de-açúcar do país e, consequentemente, do mundo. Os dados foram fornecidos por uma organização privada e correspondem a registros sistemáticos obtidos de diversas propriedades rurais distribuídas por todo o estado. O banco de dados final incluiu 2.738 parcelas para a análise da produtividade da cultura e 2.772 parcelas para a análise da incidência de infestações por *S. levis*. Nem todas as parcelas foram avaliadas em todas as safras realizadas durante o período do estudo, que abrangeu os anos de 2019 a 2023. O tamanho das parcelas variou de acordo com o ano: em 2019, variou de 0,51 ha a 58,56 ha; em 2020, de 0,5 ha a 51,99 ha; e em 2021, de 0,36 ha a 58,25 ha; e em 2022, entre 0,64 ha e 58,25 ha. e em 2023, entre 1,6 ha e 58,25 ha.

2.2. Variáveis do estudo

2.2.1. Variável dependente 1

A produtividade do cultivo de cana-de-açúcar, expressa em toneladas por hectare (t/ha). Para cumprir os requisitos de normalidade exigidos na análise estatística, esta variável foi transformada por meio de seu logaritmo natural (LnProdutividade) na análise de correlação e regressão.

2.2.2. Variável dependente 2

O dano causado pela praga é mensurada pelo setor sucroenergético pelo número de tocos atacados (AtaToco_i), quantificado pela quantidade de colmos danificadas em cada parcela amostrada.

2.2.3. Variáveis independentes

As variáveis explicativas são organizadas em quatro blocos:

Variável independente 1. Fatores climáticos:

Esta variável incluiu indicadores de temperatura (T_{0i}) (°C), umidade relativa (HR_i) (%) e velocidade do vento (VV_i) (km/h), obtidos das estações meteorológicas para cada ponto da amostra. Para homogeneizar as escalas de medição, estes indicadores foram padronizados (T_i, H_i, V_i), de acordo com as equações (1), (2) e (3):

$$T_i = \frac{T_{0i} - \overline{T_0}}{SE(T_0)} \quad (1)$$

$$H_i = \frac{HR_i - \overline{HR}}{SE(HR)} \quad (2)$$

$$V_i = \frac{VV_i - \overline{VV}}{SE(VV)} \quad (3)$$

Onde $i = 1, 2, 3, \dots, n$ representa cada parcela; $\overline{T_0}$, $\overline{HR}$ y $\overline{VV}$ correspondem às médias com indicadores de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento; y $SE(T_0)$, $SE(HR)$ y $SE(VV)$ representando seus respectivos desvios padrão.

Variável independente 2. Manejo fitossanitário:

Esta variável incluía a quantidade de insumo aplicada por hectare em litros (IAH_i)(L/ha) e os todos atacados pelo *S. levis* (AtaToco_i).

Variável independente 3. Manejo agrônômico:

Este bloco considerou indicadores como a quantidade de cortes da cana-de-açúcar na parcela amostrada (Corte_i), expresso como número de ciclo. Em adição, utilizou-se indicadores categóricos binários (Sim=1/Não=0) para controlar: época de plantio (PSP_i) (primeiro semestre

= 1; segundo semestre = 0), o uso de sistema mecânico de plantio (SMP_i) e a condição de solo (Latossolo Vermelho Eutroférico AII – Moderado), sendo este ambiente classificado como muito favorável (AEMF_i) à cultura.

Variável independente 4. População de *S. levis*:

Esta variável quantificou a densidade populacional de *S. levis* em seus diferentes estágios de desenvolvimento: de larvas (L_i), pupas (P_i) e adultos (A_i) por parcela.

2.3. Análise de dados

O processo analítico foi desenvolvido em etapas sequenciais.

2.3.1. Análise exploratória e de correlação

Inicialmente, cálculos estatísticos descritivos (média, desvio padrão, mínimo e máximo) são calculados para todas as variáveis. Posteriormente, foi realizada uma análise de correlação bivariada por meio de diagramas de dispersão com linhas de tendência linear, com o objetivo de avaliar as relações preliminares entre as variáveis independentes e dependentes. Além disso, as práticas agrônômicas são caracterizadas por frequências percentuais.

2.3.2. Modelagem por regressão linear múltipla (RLM)

A especificação geral do modelo de regressão linear múltipla, em notação vetorial, segue a formulação padrão (Greene, 2003):

$$Y = X\beta + \mu \quad (4)$$

Sendo Y o vetor da variável dependente, X é a matriz de variáveis independentes, β é o vetor de parâmetros estimado e μ é o vetor de termos de erro.

A partir da Equação (4), são estimados os modelos separados para explicar cada variável dependente:

Modelo 1: Explica a produtividade (transformada em logaritmo) em função de fatores climáticos, de manejo fitossanitário e agrônômico:

$$\text{LnProductividade}_i = \beta_{01} + \beta_{11}T_i + \beta_{21}H_i + \beta_{31}V_i + \beta_{41}IAH_i + \beta_{51}AtaToco_i + \beta_{61}Corte_i + \beta_{71}PSP_i + \beta_{81}SMP_i + \beta_{91}AEMF_i + \mu_{i1} \quad (5)$$

Modelo 2: Explica o ataque de tocos em função de fatores climáticos e da densidade populacional de *S. Levis* por estágio:

$$AtaToco_i = \beta_{02} + \beta_{12}T_i + \beta_{22}H_i + \beta_{32}V_i + \beta_{42}L_i + \beta_{52}P_i + \beta_{62}A_i + \mu_{i2} \quad (6)$$

Em ambas as equações, β_{01} e β_{02} são os interceptos, e μ representa o termo de erro idiossincrático.

Validação do modelo

1. Teste de White

Para avaliar o suposto de homocedasticidade; É dito que uma variação constante do termo de erro ($\text{Var}(\mu) = \sigma^2 I_n$) se aplica ao teste de White (White, 1980). O cumprimento deste suposto valida o uso de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), garantindo que os estimadores sejam os melhores estimadores lineares inseridos. Quando a verificação indicava violações deste pressuposto (heterocedasticidade), os parâmetros foram estimados por meio de Mínimos Quadrados Generalizados (MCG). Este método corrige a heterocedasticidade, restaurando a eficiência dos estimadores e a validade da inferência estatística (Greene, 2003; Wooldridge, 2018).

2. Coeficiente de determinação (R^2) e razão de erro médio (RMSE)

O coeficiente de determinação (R^2) quantifica a proporção da variabilidade total da variável dependente que é explicada pelo conjunto de preditores do modelo, servindo como uma medida global de seu ajuste (Greene, 2012). Por sua vez, a causa do erro médio (RMSE) é a precisão preditiva do modelo. Um valor de RMSE próximo a zero indica uma menor discrepância média entre os valores coletados e os estimados, o que reflete uma maior precisão do modelo (Wooldridge, 2018).

3. Teste de relevância global e individual

A relevância estatística global do modelo foi avaliada através do teste F de Fisher. A rejeição da hipótese nula (H_0) indica que o conjunto de variáveis independentes explica de maneira significativa a variação da variável dependente, justificando assim a validade do modelo especificado (Greene, 2012). A relevância individual de cada preditor foi avaliada por meio do teste “t” de Student para cada coeficiente estimado. O valor de H_0 para um parâmetro dado, com um nível de significância α , indica uma influência estatisticamente significativa de uma variável sobre a variável dependente (Wooldridge, 2018).

4. Teste de multicolinealidade

A presença de multicolinealidade entre os preditores foi diagnosticada utilizando o Fator de Inflação de Variância (VIF). Foi considerado que a multicolinealidade não representava um problema severo para a inferência quando o valor médio do VIF era inferior a 10 (O'Brien, 2007), o que permitiu manter todas as variáveis especificadas no modelo sem necessidade de aplicar técnicas de redução.

2.4. Análise de sensibilidade

A partir da especificação geral do modelo (Equação 4), são derivadas as medidas de mudança marginal para interpretar os coeficientes estimados (β_{MCG}). Para as variáveis independentes quantitativas, o efeito marginal corresponde diretamente ao coeficiente estimado (Equação 7). Para as variáveis categóricas (binárias), a mudança na variável dependente do passo da categoria de referência (0) para a categoria de interesse (1) também é dada pelo coeficiente estimado (Equação 8).

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = \beta_{MCG} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta Y}{\Delta X} = \beta_{MCG} \quad (8)$$

Todas as análises descritivas, econométricas e de validação dos pressupostos foram realizadas utilizando o software Stata, versão 15.0.

3. Resultados

3.1. Estatística descritiva

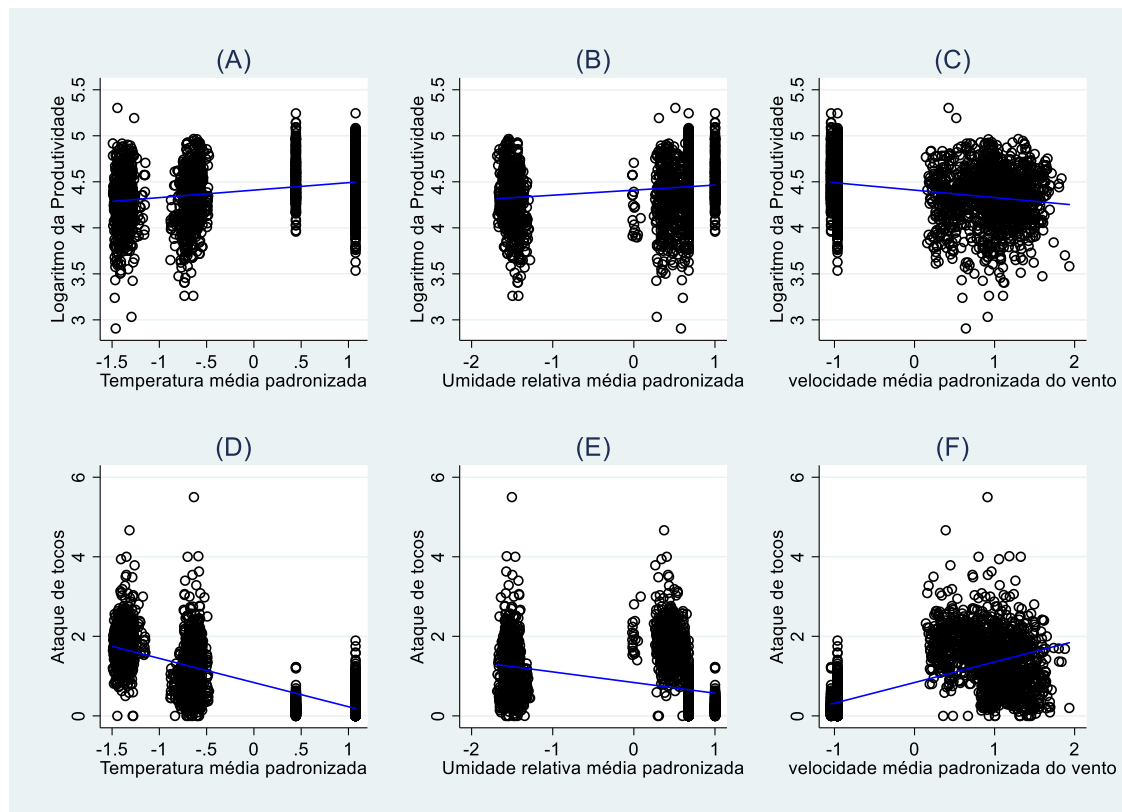


Figura 13. Correlações bivariadas entre fatores climáticos, produtividade e ataque de toco no cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, Brasil.

A produtividade média da cana-de-açúcar foi de 86,20 toneladas por hectare (t/ha), com um desvio padrão de 24,11 t/ha, variando de um mínimo de 18,30 t/ha a um máximo de 200,83 t/ha. Na Figura 1, cada ponto representa uma observação individual e a linha azul corresponde à tendência linear estimada para cada relação bivariada.

A Figura 1A mostra uma correlação positiva moderadamente acentuada entre o logaritmo da produtividade e a temperatura média padronizada. Em contraste, a Figura 1D revela uma forte correlação negativa entre a temperatura média padronizada e a incidência de infestação do colmo. A temperatura média foi de $21,76 \pm 2,76$ °C, variando de 17,65 a 24,72 °C.

A Figura 1B mostra uma tendência linear positiva com inclinação moderada entre o logaritmo da produtividade e a umidade relativa média padronizada. Por outro lado, a Figura 1E exhibe uma correlação negativa acentuada entre a infestação por toco e a variável climática. A umidade relativa apresentou um valor médio de $64,00\% \pm 9,04\%$, variando de 48,77% a 73,05%.

Por fim, a Figura 1C mostra uma tendência linear negativa com inclinação suave entre a velocidade média padronizada do vento e o logaritmo da produtividade. Em contraste, a Figura 1F indica uma correlação positiva com inclinação acentuada entre a incidência de infestação por *S. levis* e a velocidade do vento. Essa variável climática registrou uma média de $7,24 \pm 3,36$ km/h, com valores variando de 3,74 a 13,73 km/h.

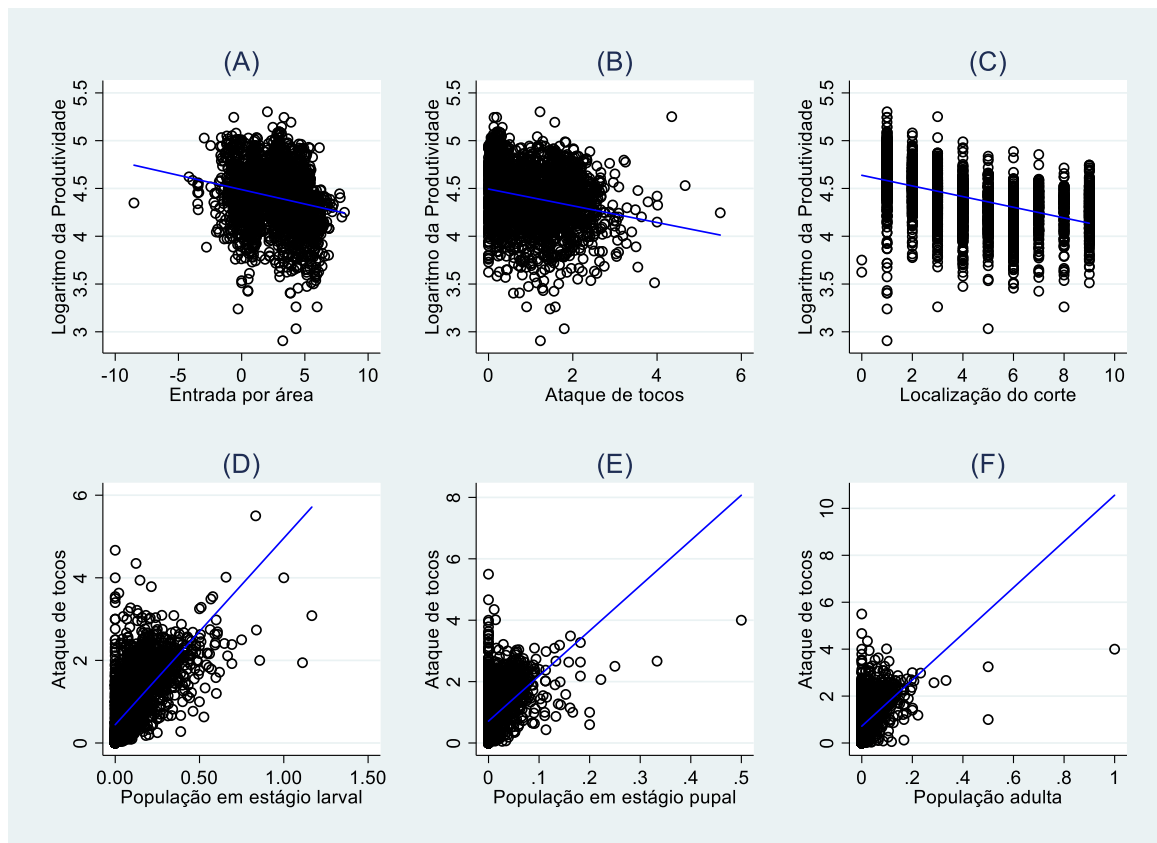


Figura 14. Correlações bivariadas entre manejo fitossanitário, local de corte, produtividade e ataque de toco no cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, Brasil.

A incidência de infestações por *S. levis* apresentou um valor médio de $0,88 \pm 0,79$, variando de 0 a 5,5 infestações. Na Figura 2, cada ponto representa uma observação individual e a linha azul indica a tendência linear estimada para cada relação bivariada.

A Figura 2A mostra uma correlação linear negativa entre a quantidade de pesticida aplicada por área e o logaritmo da produtividade. A aplicação de pesticida apresentou uma média de $64,49 \pm 160,83$ L/ha, com uma ampla variação entre 0,0002 e 3412,57 L/ha. De forma semelhante, a Figura 2B mostra uma correlação negativa entre a infestação e o logaritmo da produtividade.

A Figura 2C mostra uma tendência linear negativa entre o número de cortes (local) e o logaritmo da produtividade, evidenciando uma dispersão significativa nos valores de produtividade para o mesmo corte. O número médio de cortes foi de $3,97 \pm 2,53$, com uma variação de 0 a 9.

As Figuras 2D, 2E e 2F mostram tendências lineares positivas entre a incidência de ataques de toco e a população de *S. levis* em seus diferentes estágios. As densidades populacionais médias foram de $0,10 \pm 0,12$ (larvas), $0,01 \pm 0,02$ (pupas) e $0,02 \pm 0,04$ (adultos), com variações de 0 a 1,17, 0 a 0,5 e 0 a 1, respectivamente.

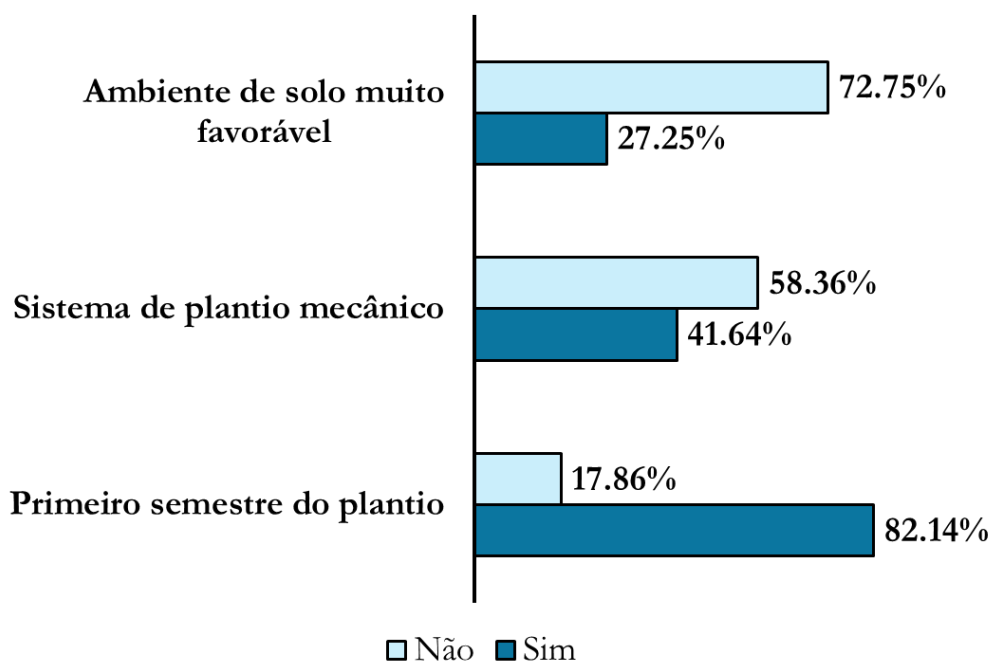


Figura 15. Caracterização do manejo agrônomo no cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, Brasil.

A Figura 3 apresenta a distribuição percentual de três indicadores-chave que compõem a variável de manejo agrônomo. Em relação à aptidão do solo, 27,25% das áreas foram classificadas como tendo um ambiente de solo "muito favorável". Os 72,75% restantes distribuíram-se entre solos de aptidão moderada com uma combinação de erosão e fertilidade (38,06%), aptidão restrita com problemas severos de erosão, baixa fertilidade ou impedimentos físicos (19,61%), marginais para a agricultura com múltiplas restrições severas (11,98%) e inadequados para a agricultura devido a condições extremas de erosão, toxicidade ou salinização (3,10%). Quanto ao sistema de plantio, 41,64% da área utilizou um sistema mecanizado. 58,36% corresponderam a outros sistemas, incluindo: Meiosi manual (28,31%), Manual cana simples (8,47%), Banqueta (7,46%), Diversos (6,83%) e Outros (7,30%). Em relação à época de plantio, 82,14% dos plantios foram realizados durante o primeiro semestre, enquanto 17,86% foram realizados no segundo semestre.

3.2. Estatística Inferencial e Análise Econométrica

Tabela 7. Modelo de regressão linear múltipla para produtividade no cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, Brasil.

Variável independente	β_{MCG}	SE(β_{MCG})	t-student (β_{MCG})	Valor p	Intervalo de confiança (IC) de 95%	
					IC(β_{MCG}) ⁻	IC(β_{MCG}) ⁺
Intercepto	4.6540	0.0205	227.1677	0.0000	4.6138	4.6942
Fatores climáticos						
Temperatura (média padronizada)	-0.0112	0.0171	-0.6569	0.5113	-0.0448	0.0223
Umidade (média padronizada)	-0.0592	0.0150	-3.9476	0.0001	-0.0886	-0.0298
Velocidade do vento (média padronizada)	-0.1267	0.0252	-5.0251	0.0000	-0.1762	-0.0773
Manejo Fitossanitário						
Insumo por área (L/ha)	-0.0120	0.0025	-4.7343	0.0000	-0.0170	-0.0070
Infestação de tocos (Número de caules danificados)	-0.0255	0.0099	-2.5661	0.0103	-0.0449	-0.0060
Manejo Agrônomo						
Quantidade de corte (Número)	-0.0570	0.0018	-32.0524	0.0000	-0.0605	-0.0535
Primeiro semestre de plantio (Sim=1/Não=0)	0.0345	0.0126	2.7272	0.0064	0.0097	0.0593
Sistema de plantio mecanizado (Sim = 1/Não = 0)	-0.0223	0.0089	-2.4974	0.0126	-0.0398	-0.0048
Ambiente do solo muito favorável (Sim = 1/Não = 0)	0.0738	0.0093	7.9315	0.0000	0.0555	0.0920
Teste de aderência						
Erro quadrático médio (RMSE)	0.2222		Número de observações		2738	
Teste F de Fisher (gl ₁ =9, gl ₂ =2728)	189.77		Prob[F≥F-Fisher/gl ₁ =9, gl ₂ =2728]		0.0000	
Coeficiente de determinação (R ²)	0.3941		Estatística VIF média		7.3000	

A Tabela 1 apresenta os resultados do modelo de regressão linear múltipla estimado para explicar a produtividade da cana-de-açúcar com base em fatores climáticos, fitossanitários e de manejo agrônomo. Os parâmetros foram estimados utilizando mínimos quadrados generalizados (MCG) para controlar a heterocedasticidade.

Os testes de ajuste do modelo indicam uma significância global. O valor do erro quadrático médio (RMSE) de 0,2222 sugere uma precisão adequada nas previsões dentro da amostra. O coeficiente de determinação (R²) de 0,3941 revela que o conjunto de preditores explica 39,41% da variabilidade total da produtividade. A significância geral do modelo é confirmada pela estatística F de Fisher (F(gl₁ = 9, gl₂ = 2728) = 189,77, valor p < 0,001). Além disso, o fator de inflação da variância (VIF = 7,30) indica a ausência de problemas graves de multicolinearidade.

A análise da relevância individual dos preditores é detalhada na sequência:

Fatores climáticos: A umidade relativa ($\beta_{MCG} = -0,0592$, valor p = 0,0001 < $\alpha = 0,01$, IC(β_{MCG})_{95%} [-0,0886, -0,0298]) e a velocidade do vento ($\beta_{MCG} = -0,1267$, valor p = 0,0000 < $\alpha = 0,01$, IC(β_{MCG})_{95%} [-0,1762, -0,0773]) apresentaram influência negativa estatisticamente significativa na produtividade. Em contrapartida, a temperatura não apresentou efeito significativo ($\beta_{MCG} = -0,0112$, valor p = 0,5113 > $\alpha = 0,10$, IC(β_{MCG})_{95%} [-0,0448, 0,0223]).

Manejo fitossanitário: Ambos os indicadores apresentaram efeitos negativos significativos. Maior insumo por área ($\beta_{MCG} = -0,0120$, valor p = 0,0000 < $\alpha = 0,01$, IC(β_{MCG})_{95%} [-0,0170, -0,0070]) e maior incidência de infestação por mancha foliar de *S. levis* ($\beta_{MCG} = -0,0255$, valor p = 0,0103 < $\alpha = 0,05$, IC(β_{MCG})_{95%} [-0,0449, -0,0060]) foram associados à menor produtividade.

Manejo agrônomo: Este bloco apresenta os preditores mais influentes. A localização do ponto de corte ($\beta_{MCG} = -0,0570$, valor-p = 0,0000 < $\alpha = 0,01$, IC(β_{MCG})_{95%} [-0,0605, -0,0535]) mostra o coeficiente de maior influência. O plantio no primeiro semestre ($\beta_{MCG} = 0,0345$, valor-p = 0,0064 < $\alpha = 0,01$, IC(β_{MCG})_{95%} [0,0097, 0,0593]) e a presença de um ambiente edafoclimático muito favorável ($\beta_{MCG} = 0,0738$, valor-p = 0,0000 < $\alpha = 0,01$, IC(β_{MCG})_{95%} [0,0555, 0,0920]) estão positivamente associados à produtividade. O uso de um sistema de plantio mecânico apresentou um efeito negativo significativo ($\beta_{MCG} = -0,0223$, valor p = 0,0126 < $\alpha = 0,05$, IC(β_{MCG})_{95%} [-0,0398, -0,0048]).

O intercepto do modelo foi altamente significativo ($\beta_{MCG} = 4,6540$, valor p = 0,0000 < $\alpha = 0,01$, IC(β_{MCG})_{95%} [4,6138, 4,6942]), sugerindo a existência de outros determinantes da produtividade não incluídos no modelo atual, o que representa uma área para pesquisas futuras.

Tabela 8. Modelo de regressão linear múltipla correspondente ao ataque de tocos na cana-de-açúcar cultivada no estado de São Paulo, Brasil.

Variável independente	β_{MCG}	SE(β_{MCG})	t-student (β_{MCG})	Valor p	Intervalo de confiança (IC) de 95%	
					IC(β_{MCG}) ⁻	IC(β_{MCG}) ⁺
Intercepto	0.5657	0.0180	31.4047	0.0000	0.5304	0.6010
Fatores climáticos						
Temperatura (média padronizada)	-0.3079	0.0312	-9.8516	0.0000	-0.3691	-0.2466
Umidade (média padronizada)	0.1482	0.0286	5.1860	0.0000	0.0922	0.2042
Velocidade do vento (média padronizada)	0.2200	0.0497	4.4247	0.0000	0.1225	0.3175
População de Sphenophorus levis						
Estágio larval (Número)	2.2647	0.1657	13.6638	0.0000	1.9397	2.5897
Estágio pupal (Número)	2.1303	0.7444	2.8617	0.0042	0.6706	3.5901
Estágio adulto (Número)	2.0070	0.8744	2.2952	0.0218	0.2924	3.7216
Teste de aderência						
Erro quadrático médio (RMSE)	0.3990		Número de observações		2772	

Teste F de Fisher ($gl_1=6$, $gl_2=2765$)	1178,59	Prob[F $\geq$ F-Fisher/ $gl_1=6$, $gl_2=2765$]	0,0000
Coefficiente de determinação (R^2)	0,7428	Estatística VIF média	9,5100
Valor-p = 2Prob[t $\geq$ t-student/ $gl=2765$] o valor-p = 2Prob[t $\leq$ t-student/ $gl=2765$].			
$gl_1 = k-1$: Graus de liberdade do numerador, $gl_2 = n - k$: Graus de liberdade do denominador.			

A Tabela 2 apresenta os resultados do modelo de regressão linear múltipla estimado, utilizado para explicar a incidência de infestação por *S. levis* em função de fatores climáticos e da população da praga em seus diferentes estágios de vida. A estimativa foi realizada utilizando mínimos quadrados generalizados (MCG) para corrigir a heterocedasticidade.

As métricas de ajuste indicam um modelo robusto e altamente explicativo. Um valor de erro quadrático médio (RMSE) de 0,3990 reflete um bom poder preditivo dentro da amostra. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,7428$) revela que 74,28% da variabilidade na infestação é explicada pelas variáveis preditoras incluídas. A significância estatística geral do modelo é confirmada pela estatística F de Fisher ($F(gl_1 = 6, gl_2 = 2765) = 1178,59$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$). O fator médio de inflação da variância ($VIF = 9,51$), embora próximo do limite de 10, sugere que a multicolinearidade não representa um problema significativo para a inferência.

O intercepto do modelo foi altamente significativo ($\beta_{MCG} = 0,5657$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$, $IC(\beta_{MCG})_{95\%} [0,5304, 0,6010]$), indicando a presença de outros fatores que determinam o ataque e que não foram incluídos neste modelo, abrindo assim uma linha de investigação para pesquisas futuras.

A análise dos efeitos individuais mostrou o seguinte:

Fatores climáticos: A temperatura apresentou uma forte associação negativa com o ataque de toco ($\beta_{MCG} = -0,3079$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$, $IC(\beta_{MCG})_{95\%} [-0,3691, -0,2466]$), sugerindo um efeito inibitório. Em contraste, tanto a umidade relativa ($\beta_{MCG} = 0,1482$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$, $IC(\beta_{MCG})_{95\%} [0,0922, 0,2042]$) quanto a velocidade do vento ($\beta_{MCG} = 0,2200$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$, $IC(\beta_{MCG})_{95\%} [0,1225, 0,3175]$) estiveram positivamente associadas a uma maior incidência de danos.

População de *S. levis*: Todos os estágios de desenvolvimento da praga mostraram uma forte influência positiva, estatisticamente significativa, na infestação por toco, confirmando seu papel central como fator de dano. O estágio larval apresentou o efeito mais pronunciado e preciso ($\beta_{MCG} = 2,2647$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$, $IC(\beta_{MCG})_{95\%} [1,9397, 2,5897]$), seguido pelo estágio pupal ($\beta_{MCG} = 2,1303$, valor $p = 0,0042 < \alpha = 0,01$, $IC(\beta_{MCG})_{95\%} [0,6706, 3,5901]$) e pelo estágio adulto ($\beta_{MCG} = 2,0070$, valor $p = 0,0218 < \alpha = 0,05$, $IC(\beta_{MCG})_{95\%} [0,2924, 3,7216]$). Vale ressaltar que, embora os coeficientes para pupa e adulto sejam de magnitude semelhante aos da larva, seus intervalos de confiança consideravelmente mais amplos indicam menor precisão nessas estimativas, provavelmente relacionada à variabilidade na contagem desses estágios.

No geral, os resultados destacam a importância crítica da densidade populacional de *S. levis*, particularmente em seus estágios larval e pupal, como o principal fator determinante da infestação por toco, enquanto os fatores climáticos atuam como moduladores ambientais do risco.

4. Discussão dos resultados

Este estudo integra uma análise empírica da produtividade e da infestação por *S. levis* na cana-de-açúcar. As evidências geradas por modelos econométricos revelam uma interação complexa entre fatores climáticos, manejo fitossanitário, práticas agrônômicas e a dinâmica populacional

da praga, reforçando a necessidade de implementar estratégias de manejo integrado baseadas em evidências locais.

4.1. Efeitos dos Fatores Climáticos na Produtividade e Infestação por Pragas

Os resultados mostram que a temperatura não tem um efeito estatisticamente significativo na produtividade da cultura (Tabela 1). No entanto, foi encontrado um efeito significativo da temperatura na infestação por *S. levis* ($\beta_{MCG} = -0,3079$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$; Tabela 2), refletindo uma correlação bivariada negativa (Figura 1D). Nesse sentido, um aumento de uma unidade na temperatura média padronizada contribui para uma diminuição na infestação por *S. levis* em 0,31. Essa descoberta concorda com pesquisas anteriores que indicam que a faixa de temperatura ideal para o desenvolvimento e comportamento de *S. levis* está entre 21 e 35 °C (Barreto-Triana et al., 2014). Em contraste, em nossa área de estudo, a temperatura média foi de $21,76 \pm 2,76$ °C, que se encontra dentro dessa faixa. Contudo, variações extremas podem limitar a oviposição e a atividade alimentar, reduzindo assim os danos. Em relação à umidade relativa e à velocidade do vento, ambas apresentaram influência negativa na produtividade e positiva na infestação (Tabelas 1 e 2). Um aumento padronizado de 1% na umidade relativa reduz a produtividade em 5,92% e aumenta a infestação em 0,15 unidades. Da mesma forma, um aumento equivalente na velocidade do vento reduz a produtividade em 12,67% e aumenta a infestação em 0,22 unidades. Portanto, condições de maior umidade e vento favorecem a dispersão dos adultos e a percepção de compostos voláteis atrativos, como o 2-metil-4-octanol descrito por Zarbin et al. (2003), bem como a fermentação de resíduos da cultura (Martins et al., 2020; Rosa et al., 2024), aumentando o risco de infestação.

4.2. Impacto da infestação por *S. levis* e eficácia do manejo fitossanitário

O modelo de produtividade (Tabela 1) confirma que a infestação por *S. levis* tem um efeito inverso significativo ($\beta_{MCG} = -0,0255$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$). Isso implica que, para cada colmo danificado adicional, a produtividade diminui em 2,55%. Esse resultado é consistente com pesquisas que documentam como os túneis de alimentação comprometem o rizoma e o sistema vascular da planta (Catarino et al., 2019; Soares-Costa et al., 2011). Em relação à população larval, observou-se maior impacto nos danos ($\beta_{MCG} = 2,2647$, valor de $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$), reforçando a necessidade de estratégias de controle direcionadas a esse estágio, como o uso de nematoides entomopatogênicos (*Steinernema rarum*, *S. carpocapsae*), que têm demonstrado eficácia entre 60% e 78% (Casteliani et al., 2020; Leite et al., 2023; Silva Oliveira et al., 2021).

Um achado fundamental foi a relação negativa entre a aplicação de insumos fitossanitários por área e a produtividade da cultura ($\beta_{MCG} = -0,0120$, valor de $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$), de modo que um aumento de 1% na aplicação de produtos químicos reduz a produtividade em 1,20%. Isso indica que aplicações programadas ou reativas, sem um limiar econômico definido, não são apenas ineficazes — como evidenciado pela eficácia limitada destes produtos químicos no controle de larvas de rizoma (Soares-Costa et al., 2011) — mas também podem induzir fitotoxicidade, alterar a biologia do solo ou gerar resistência, diminuindo assim a produtividade. Esses achados corroboram a transição para estratégias mais precisas e baseadas em princípios biológicos, como argumentado por Ferreira et al. (2024) e Xavier et al. (2024), que sugerem que o controle químico deve ser aplicado racionalmente e como complemento a outros métodos.

4.3. O Papel Determinante do Manejo Agrônomico

A qualidade do solo (“ambiente de solo altamente favorável”) é o preditor positivo mais forte da produtividade ($\beta_{MCG} = 0,0738$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$; Tabela 1). Isso implica que solos com boa estrutura, fertilidade e drenagem promovem o desenvolvimento radicular e a tolerância das plantas à infestação por *S. levis*, aumentando a produtividade em 7,38% em comparação com solos que não possuem essas características. Por outro lado, a remoção de resíduos da

cultura (palha), prática recomendada por [De Castro et al. \(2019\)](#) para reduzir as infestações, não foi uma variável explícita em nosso modelo; no entanto, sua ausência pode se refletir em populações mais elevadas de *S. levis* e em uma correlação positiva com a infestação por toco.

O sistema de plantio mecanizado apresentou um efeito negativo inesperado ($\beta_{MCG} = -0,0223$, valor $p = 0,0126 < \alpha = 0,05$; Tabela 1), com sua adoção reduzindo a produtividade em 2,23% em comparação com outros sistemas. Isso sugere que a compactação do solo causada pelas máquinas pode criar condições favoráveis à sobrevivência das larvas ou dificultar a penetração de agentes de controle biológico. Da mesma forma, o número de rebrotas mostrou-se o fator mais influente na redução da produtividade ($\beta_{MCG} = -0,0570$, valor $p = 0,0000 < \alpha = 0,01$; Tabela 1), indicando que um aumento no número de rebrotas reduz a produtividade em 5,70%. Isso é atribuído ao desgaste progressivo do rizoma e ao acúmulo de inóculo da praga em ciclos contínuos, em consonância com os resultados de [Pavlu e Molin \(2016\)](#).

4.4. Direções para um Manejo Integrado e Adaptável ao Clima

As evidências geradas reforçam a necessidade de adotar uma abordagem de manejo integrado de pragas, adaptável ao controle de *S. levis*. O alto poder explicativo do modelo de ataque dos três estágios da praga ($R^2 = 0,7428$), baseado em fatores climáticos e nos estágios larval, pupal e adulto da praga, indica que é possível desenvolver sistemas de alerta precoce e monitoramento utilizando esses preditores, como proposto por [Campos et al. \(2022\)](#).

Portanto, novas direções de pesquisa podem incluir:

- Controle biológico com nematoides entomopatogênicos (*Steinernema spp.*) aplicados na pós-colheita, quando as larvas são mais acessíveis ([Casteliani et al., 2020](#)).
- Manejo de precisão da cultura, incluindo a remoção de resíduos nas zonas de transferência ([Rosa et al., 2024](#)), prática que nosso modelo associa a resultados favoráveis quando combinada com o plantio no primeiro semestre e o uso de variedades adaptadas à aptidão do solo.
- Controle químico racional, que deve ser aplicado somente quando os limiares de dano econômico de pelo menos 5,93% forem ultrapassados ([Xavier et al., 2024](#)), preferencialmente com formulações granuladas de maior atividade residual ([Ferreira et al., 2024](#)).

Finalmente, o modelo de produtividade ($R^2 = 0,3941$) explica uma proporção significativa da variabilidade por meio das variáveis especificadas na Tabela 1. A variabilidade não explicada indica a influência de fatores não mensurados, como a presença de inimigos naturais nativos, o nível de conhecimento do produtor, controle de qualidade nos tratamentos culturais e a variabilidade genética da cultura. Por essa razão, pesquisas futuras devem integrar essas variáveis em modelos bioeconômicos, como proposto por [Catarino et al. \(2019\)](#) e [Reeves et al. \(2017\)](#), para avaliar a rentabilidade de estratégias de manejo integrado em diferentes cenários climáticos e de mercado.

5. Conclusões

Esta pesquisa fornece evidências quantitativas robustas que especificam os principais determinantes da produtividade da cana-de-açúcar e a incidência de infestação por *S. levis* em um contexto agrícola extensivo. Os principais resultados são os seguintes:

A infestação por *S. levis* é um fator limitante crítico para a produtividade, cuja dinâmica é condicionada por variáveis climáticas. Uma relação causal negativa estatisticamente significativa foi confirmada entre a incidência de danos causados pela infestação por *S. levis* e a produtividade da cultura. Esses danos são impulsionados principalmente por populações da

praga em seus estágios larval, pupal e adulto. Fatores climáticos como maior umidade relativa e velocidade do vento aumentam a incidência de infestação; inversamente, temperaturas mais altas dentro da faixa estudada têm um efeito supressor, definindo assim um perfil de risco agroclimático específico.

Em relação ao manejo fitossanitário, o modelo tradicional baseado em aplicações programadas de insumos químicos se mostra ineficaz e até mesmo contraproducente. A análise de modelagem revela uma relação causal negativa estatisticamente significativa entre o volume de insumos aplicados por unidade de área e a produtividade. Isso sugere que as estratégias de controle químico não são apenas ineficazes no manejo de populações de larvas protegidas no rizoma, mas também podem induzir fitotoxicidade ou desequilíbrios biológicos que, em última análise, reduzem a produtividade.

Por outro lado, a qualidade do solo e as práticas agronômicas são identificadas como os preditores mais influentes da produtividade. Um ambiente de solo classificado como “muito favorável” é o fator positivo mais forte, ressaltando a importância fundamental da saúde e fertilidade do solo. Em contrapartida, o aumento do número de colheitas é o indicador que mais contribui para a diminuição da produtividade, refletindo o esgotamento progressivo da planta. Vale ressaltar que o plantio no primeiro semestre do ano está causalmente associado a uma maior produtividade, enquanto o sistema de plantio mecanizado apresentou um efeito negativo inesperado, provavelmente relacionado a processos de compactação do solo.

Finalmente, a viabilidade de modelos preditivos para fundamentar o Manejo Integrado de Pragas (MIP) adaptado às mudanças climáticas é validada. O elevado poder explicativo ($R^2 = 0,7428$) do modelo para prever infestações de *S. levis* indica o potencial para o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce baseados em variáveis climáticas e no monitoramento das populações. Essa abordagem permitiria uma mudança do controle reativo para o controle racional e preventivo.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada pelo projeto da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo [2017/25258-1], suporte financeiro da PROPE/UNESP no âmbito do Centro de Pesquisa em Engenharia - Fitossanidade da Cana-de-Açúcar (CEPENFITO), vinculado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

Declaração de Contribuição dos Autores

Conceptualização: [ARR, DFLS], Metodologia: [ARR, DFLS], Análise Formal e Pesquisa: [ARR, DFLS]; Redação - Preparação Original do Rascunho: [ARR]; Escrita - Revisão e Edição: [ARR, DFLS]; Obtenção de Financiamento: [DFLS]; Supervisão: [DFLS].

Declaração de Conflito de Interesses

Os autores declaram não haver conflitos de interesse financeiros ou pessoais que possam ser percebidos como influenciando o trabalho apresentado neste artigo.

Referências bibliográficas

- Al Basir, F., Samanta, S., & Tiwari, P. K. (2023). Bistability, Generalized and Zero-Hopf Bifurcations in a Pest Control Model With Farming Awareness. *Journal of Biological Systems*, 31(1), 115–140. <https://doi.org/10.1142/S0218339023500079>
- Alemneh, H. T., Kassa, A. S., & Godana, A. A. (2021). An optimal control model with cost effectiveness analysis of Maize streak virus disease in maize plant. *Infectious Disease Modelling*, 6, 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.12.001>

- Anwar, N., Ahmad, I., Kiani, A. K., Shoaib, M., & Raja, M. A. Z. (2023). Numerical treatment for mathematical model of farming awareness in crop pest management. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 9(1208774), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fams.2023.1208774>
- Barreto-Triana, N., dos Santos Dias, C. T., & S. Bento, J. M. (2014). Reproductive behavior of the sugarcane weevil, *Sphenophorus levis* (Coleoptera: Curculionidae) in laboratory. *Revista Colombiana de Entomologia*, 40(2), 265–271.
- Campos, J. C., Manrique-Silupú, J., Dorneanu, B., Ipanaqué, W., & Arellano-García, H. (2022). A smart decision framework for the prediction of thrips incidence in organic banana crops. *Ecological Modelling*, 473(110147), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110147>
- Casteliani, A., de Fatima Martins, L., Maringoli Cardoso, J. F., Oliveira Silva, M. S., Abe da Silva, R. S., Chacon-Orozco, J. G., Barbosa Casteliani, A. G., Půža, V., Harakava, R., & Leite, L. G. (2020). Behavioral aspects of *Sphenophorus levis* (Coleoptera: Curculionidae), damage to sugarcane and its natural infection by *Steinernema carpocapsae* (Nematoda: Rhabditidae). *Crop Protection*, 137(105262), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105262>
- Catarino, R., Areal, F., Park, J., & Parisey, N. (2019). Spatially explicit economic effects of non-susceptible pests' invasion on Bt maize. *Agricultural Systems*, 175, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.05.008>
- Chowdhury, J., Al Basir, F., Takeuchi, Y., Ghosh, M., & Roy, P. K. (2019). A mathematical model for pest management in *Jatropha curcas* with integrated pesticides - An optimal control approach. *Ecological Complexity*, 37, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2018.12.004>
- De Castro, S. G. Q., Dinardo-Miranda, L. L., Fracasso, J. V., Bordonal, R. O., Menandro, L. M. S., Franco, H. C. J., & Carvalho, J. L. N. (2019). Changes in Soil Pest Populations Caused by Sugarcane Straw Removal in Brazil. *Bioenergy Research*, 12(4), 878–887. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10019-4>
- Degaspari, N., Botelho, P. S. M., Almeida, L. C. de, & Castilho, H. J. (1987). Biologia de *Sphenophorus levis* Vaurie, 1978 (Col.: Curculionidae), em dieta artificial e no campo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 22(6), 553–558. <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/14389>
- Ferreira, P. H. U., Ferreira, M. D. C., & Vieira, E. (2024). Improving *Sphenophorus levis* Adult Mortality Through Solid Insecticide Applications and Increased Insecticide Dose. *Neotropical Entomology*, 53(6), 1293–1308. <https://doi.org/10.1007/s13744-024-01204-y>
- Fonseca, F. P. P., Soares-Costa, A., Ribeiro, A. F., Rosa, J. C., Terra, W. R., & Henrique-Silva, F. (2012). Recombinant expression, localization and in vitro inhibition of midgut cysteine peptidase (Sl-CathL) from sugarcane weevil, *Sphenophorus levis*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 42(1), 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2011.10.008>
- Fotso Fotso, Y., Touzeau, S., Berge, T., Bowong, S., & Grogard, F. (2021). Modelling and optimal strategy to control coffee berry borer. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 44(18), 14569–14592. <https://doi.org/10.1002/mma.7726>
- Gatwiri, M. B., Ronoh, M., Ngari, C. G., & Kitavi, D. M. (2024). Mathematical Modelling of Host-Pest Interaction in the Presence of Insecticides and Resistance: A Case of Fall Armyworm. *Journal of Mathematics*, 2024, 1–23. <https://doi.org/10.1155/2024/2886786>

- Ghosh, S., & Bhattacharya, D. K. (2010). Optimization in microbial pest control: An integrated approach. *Applied Mathematical Modelling*, 34(5), 1382–1395. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.08.026>
- Greene, W. H. (2003). Econometric analysis. In *Prentice Hall*.
- Greene, W. H. (2012). Econometric Analysis. In *Pearson Education* (Seventh Ed). http://www.mysmu.edu/faculty/zlyang/DSA305_2024T2Web/William_H_Greene-Econometric_Analysis-7th.pdf
- Hall, D. C., & Duncan, G. M. (1984). Econometric evaluation of new technology with an application to integrated pest management. *American Journal of Agricultural Economics*, 66(5), 624–633. <https://doi.org/10.2307/1240969>
- Leite, L. G., Chacon-Orozco, J. G., Shapiro-Ilan, D. I., Baldo, F. B., & Cardoso, J. F. M. (2023). Effects of temperature for optimizing production and storage of *Steinernema rorum* in a novel biphasic process, and efficacy of the nematode against *Sphenophorus levis*. *Biological Control*, 187(October), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105381>
- Liang, X., Pei, Y., Zhu, M., & Lv, Y. (2016). Multiple kinds of optimal impulse control strategies on plant-pest-predator model with eco-epidemiology. *Applied Mathematics and Computation*, 287–288, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.04.034>
- Liu, Z., Griffin, T. W., Kirkpatrick, T. L., & Monfort, W. S. (2015). Spatial econometric approaches to developing site-specific nematode management strategies in cotton production. *Precision Agriculture*, 16(5), 587–600. <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9386-9>
- Martins, L. F., Tonelli, M., Bento, J. M. S., Bueno, C. J., & Leite, L. G. (2020). Attraction of the sugarcane billbug, *Sphenophorus levis*, to vinasse and its volatile composition. *Chemoecology*, 30(5), 205–214. <https://doi.org/10.1007/s00049-020-00310-8>
- Mohan, C., Shibao, P. Y. T., de Paula, F. F. P., Toyama, D., Vieira, M. A. S., Figueira, A., Scotton, D., Soares-Costa, A., & Henrique-Silva, F. (2021). hRNAi-mediated knock-down of *Sphenophorus levis* V-ATPase E in transgenic sugarcane (*Saccharum* spp interspecific hybrid) affects the insect growth and survival. *Plant Cell Reports*, 40(3), 507–516. <https://doi.org/10.1007/s00299-020-02646-5>
- Molter, A., Bezerra, J. I. M., Rafikova, E., Nava, D. E., & Rafikov, M. (2023). Dynamics and biological control of the sugarcane borer with two parasitoids. *Ecological Modelling*, 481(110371), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110371>
- Naciones Unidas. (2024). The Sustainable Development Goals Report. In *United Nations*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf>
- O'Brien, R. M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality and Quantity*, 41(5), 673–690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Pavlu, F. A., & Molin, J. P. (2016). Plano de amostragem e distribuição espacial para controle localizado de *Sphenophorus Levis* em cana-de-açúcar. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 38(3), 279–287. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i3.28599>
- Reeves, T., Ohtsuki, H., & Fukui, S. (2017). Asymmetric public goods game cooperation through pest control. *Journal of Theoretical Biology*, 435, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2017.09.006>

- Régnier, B., Legrand, J., Calatayud, P. A., & Rebaudo, F. (2023). Developmental Differentiations of Major Maize Stemborers Due to Global Warming in Temperate and Tropical Climates. *Insects*, 14(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/insects14010051>
- Rosa, J. O., Soares, J. R. S., & Fernandes, O. A. (2024). Harvest load transfer sites influence sugarcane billbug (Coleoptera: Curculionidae) spatiotemporal injury in sugarcane. *Pest Management Science*, 80(4), 1771–1778. <https://doi.org/10.1002/ps.7912>
- Schneider, V. K., Soares-Costa, A., Chakravarthi, M., Ribeiro, C., Chabregas, S. M., Falco, M. C., & Henrique-Silva, F. (2017). Transgenic sugarcane overexpressing CaneCPI-1 negatively affects the growth and development of the sugarcane weevil *Sphenophorus levis*. *Plant Cell Reports*, 36(1), 193–201. <https://doi.org/10.1007/s00299-016-2071-2>
- Schumacher, S. K., Marsh, T. L., & Williams, K. A. (2006). Optimal pest control in greenhouse production of ornamental crops. *Agricultural Economics*, 34(1), 39–50. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2006.00101.x>
- Silva Oliveira, M. S., Cardoso Maringoli, J. F., Ferreira Pacheco, M. E., Baldo Berton, F., Silva Abe, R. S., Chacon-Orozco, J. G., Shapiro-Ilan, D. I., Hazir, S., Bueno, C. J., & Leite, L. G. (2021). An assessment of *steinernema rarum* as a biocontrol agent in sugarcane with focus on *sphenophorus levis*, host-finding ability, compatibility with vinasse and field efficacy. *Agriculture (Switzerland)*, 11(6), 1–16. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060500>
- Soares-Costa, A., Dias, A. B., Dellamano, M., de Paula, F. F. P., Carmona, A. K., Terra, W. R., & Henrique-Silva, F. (2011). Digestive physiology and characterization of digestive cathepsin L-like proteinase from the sugarcane weevil *Sphenophorus levis*. *Journal of Insect Physiology*, 57(4), 462–468. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2011.01.006>
- White, H. (1980). A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. *Econometrica*, 48(4), 817–838.
- Wooldridge, J. M. (2018). *Econometrics Introductory Modern Approach*. In *Cengage*.
- Xavier, G. G., de Sá Farias, E., do Carmo, D. das G., Guedes, A. G., Samuels, R. I., de Freitas, D. R., Pereira, E. J. G., Lima, E., & Picanço, M. C. (2024). Determining Factors and Economic Injury Levels for *Sphenophorus levis* for Chemical and Biological Control in Irrigated and Non-irrigated Sugarcane Crops. *Neotropical Entomology*, 53(4), 955–963. <https://doi.org/10.1007/s13744-024-01175-0>
- Zarbin, P. H. G., De Beni Arrigon, E., Reckziegel, A., Moreira, J. A., Baraldi, P. T., & Vieira, P. C. (2003). Identification of male-specific chiral compound from the sugarcane weevil *Sphenophorus levis*. *Journal of Chemical Ecology*, 29(2), 377–386. <https://doi.org/10.1023/A:1022634012212>

Conclusões

Para o controle eficiente da praga *Sphenophorus levis* em lavouras de cana-de-açúcar nas áreas agrícolas do estado de São Paulo, Brasil, é imprescindível a adoção de estratégias baseadas no manejo integrado de pragas (MIP). Essa abordagem deve combinar o uso de pesticidas químicos e biológicos com práticas culturais, mecânicas e agrícolas. Essa conclusão é corroborada pelos achados do segundo artigo analisado, que, por meio da aplicação de modelagem matemática, econométrica e de teoria dos jogos, demonstra que a estratégia ótima deve ser voltada à maximização da produtividade, rendimento, rentabilidade, receita e benefícios econômicos, minimizando os custos associados à manutenção, operação e controle da praga. É importante ressaltar que os modelos avaliados indicam que não existe uma solução única aplicável a todos os contextos agrícolas; ao contrário, a eficácia das medidas depende diretamente das condições específicas de cada contexto. Assim, enquanto em alguns cenários a cultura pode tolerar certos níveis de infestação, em outros a presença da praga é crítica e requer intervenções imediatas e mais intensas.

Com relação ao terceiro artigo, os dois anteriores forneceram o suporte teórico necessário para interpretar os resultados referentes à produtividade da cana-de-açúcar e sua relação com a infestação de tocos por *Sphenophorus levis*. Este estudo encontrou evidências estatisticamente e econometricamente significativas que confirmam a influência de variáveis como condições climáticas, estratégias de controle de pragas e práticas agrícolas implementadas na produtividade da cultura. Também foi constatado que o aumento da presença de tocos atacados está associado a condições climáticas favoráveis à praga e à alta densidade populacional de *Sphenophorus levis* em seus estágios larval, pupal e adultos. Esses resultados reforçam a necessidade de se considerar os fatores ambientais e a dinâmica populacional da praga ao se elaborar programas de manejo adaptados a cada contexto.