

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CÂMPUS DE DRACENA**

Paulo Henrique Scholl da Silva

**INFLUÊNCIA DO VOLUME DE APLICAÇÃO COM DRONES
NA DEPOSIÇÃO E CONTROLE DE *DIATRAEA*
SACCHARALIS EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dracena

2026

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CÂMPUS DE DRACENA**

Paulo Henrique Scholl da Silva

**INFLUÊNCIA DO VOLUME DE APLICAÇÃO COM DRONES
NA DEPOSIÇÃO E CONTROLE DE *DIATRAEA*
SACCHARALIS EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Ciências Agrárias e
Tecnológicas – Unesp, Câmpus de Dracena
como parte das exigências para obtenção do
título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Pereira Prado

Dracena

2026



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Dracena



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Influência do volume de aplicação com Drones na deposição e controle de *Diatraea saccharalis* em cultivo de cana-de-açúcar

Modalidade: **Atividades de pesquisa**

Autor: Paulo Henrique Scholl da Silva

Orientador: Prof. Dr. Evandro Pereira Prado

Número de Créditos: 12

Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 29/05/2026

Prof. Dr. Evandro Pereira
Prado

Prof. Dr. Ronaldo Cintra
Lima

Prof. Dr. Sérgio Bispo
Ramos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, fonte de força, sabedoria e esperança em todos os momentos desta caminhada. Aos meus pais, Gedaias e Rosana, pelo amor, apoio incondicional e pelos ensinamentos transmitidos com exemplo, humildade e perseverança, mostrando-me sempre a importância de nunca desistir dos meus sonhos. À minha noiva, Beatriz, por todo o amor, apoio, paciência e incentivo ao longo destes anos, estando ao meu lado nos momentos mais difíceis e celebrando comigo cada conquista desta trajetória. E ao meu avô, Melchiades Cornascini (in memoriam), cuja memória, valores e ensinamentos permanecem vivos em meu coração, sendo inspiração constante ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Evandro Pereira Prado pela orientação, dedicação e por todo o conhecimento compartilhado ao longo desta jornada acadêmica. À Usina Viterra Bioenergia S.A. e à LS Drone Rural pela parceria e disponibilização da área e equipamentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2024/14941-6.

“O campo é movido por coragem, conhecimento e pela persistência de quem acredita no impossível.” (*Alysson Paolinelli*).

RESUMO

A broca-da-cana, *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae), é uma das principais pragas da cana-de-açúcar, capaz de reduzir significativamente a qualidade e o potencial produtivo da cultura. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a influência do volume de aplicação sobre os parâmetros da pulverização e a eficiência de controle de *D. saccharalis* utilizando drones agrícolas. O estudo de cobertura, densidade de gotas e deposição da calda foi realizado com papel hidrossensível e corante Azul Brilhante, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro tratamentos (10, 15, 20 e 25 L ha⁻¹) e 12 repetições. O experimento de controle da praga foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), na área experimental da Usina Viterro Bioenergia S.A. (Junqueirópolis-SP), utilizando o drone DJI Agras T40. Os resultados demonstraram tendência de aumento na densidade de gotas e cobertura com a elevação do volume de aplicação, com comportamento de saturação a partir de 15 L ha⁻¹. O diâmetro mediano volumétrico (DMV) e o volume depositado apresentaram aumento significativo nos maiores volumes aplicados. A porcentagem de recuperação da calda variou entre os tratamentos, atingindo valores de até 96%. Quanto à eficiência biológica, a baixa infestação natural da praga na área experimental não permitiu diferenciar estatisticamente os tratamentos. Conclui-se que o aumento do volume de aplicação influencia principalmente os parâmetros físicos da pulverização, promovendo maior deposição e uniformidade, enquanto a avaliação da eficiência biológica foi limitada pela baixa ocorrência natural de *D. saccharalis*.

Palavras-chave: Pulverização. Drone. Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The sugarcane borer, *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae), is one of the main pests of sugarcane, capable of significantly reducing crop quality and productive potential. This study aimed to evaluate the influence of application volume on spray parameters and the control efficiency of *D. saccharalis* using agricultural drones. The evaluation of coverage, droplet density, and spray deposition was carried out using water-sensitive paper and Brilliant Blue dye, in a Completely Randomized Design (CRD), with four treatments (10, 15, 20, and 25 L ha⁻¹) and 12 replications. The pest control experiment was conducted in a Randomized Block Design (RBD) at the experimental area of Usina Viterria Bioenergia S.A. (Junqueirópolis-SP, Brazil), using a DJI Agras T40 drone. The results demonstrated a trend of increasing droplet density and coverage with increasing application volume, showing a saturation behavior from 15 L ha⁻¹ onward. The volumetric median diameter (VMD) and deposited volume increased significantly with higher application volumes. Spray recovery percentage varied among treatments, reaching values up to 96%. Regarding biological efficiency, the low natural infestation of the pest in the experimental area did not allow statistical differentiation among treatments. It is concluded that increasing application volume mainly influences the physical parameters of spraying, promoting greater deposition and uniformity, while the evaluation of biological efficiency was limited by the low natural occurrence of *D. saccharalis*.

Keywords: Spraying. Drone. Sugarcane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Drone DJI Agras T40	22
Figura 2 -	Esquema da disposição dos papéis hidrossensíveis	24
Figura 3 -	Disposição das Placas de Petri.	25
Figura 4 -	Croqui demonstrando a disposição das parcelas e tratamentos.	27
Figura 5 -	Pesagem da quantidade de produto indicado	28
Figura 6 -	Armadilha de feromônio utilizada para monitoramento	29
Figura 7 -	Levantamento da infestação de broca na área experimental	30
Figura 8 -	Flutuação populacional de <i>Diatraea saccharalis</i>	35
Figura 9 -	Dados meteorológicos diários registrados em Dracena-SP	36
Figura 10 -	Sintomas de Podridão Vermelha	39
Figura 11 -	Índice de Intensidade de Infestação Final (IIF) nos tratamentos	40
Figura 12 -	Produtividade da cana (TCH) nos diferentes tratamentos.	40

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância (<i>Analysis of Variance</i>)
AR	Amplitude
CV	Coeficiente de Variação
DAA	Dias Após a Aplicação
DBC	Delineamento em Blocos Casualizados
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado
DMV	Diâmetro Mediano Volumétrico
EC	Eficiência de Controle
I.I.I.	Índice de Intensidade de Infestação
MIP	Manejo Integrado de Pragas
NC	Nível de Controle
NDE	Nível de Dano Econômico
PR	Porcentagem de Recuperação
PRD	Potencial de Risco de Deriva
PSA	Papel Sensível à Água
RPA	Aeronave Remotamente Pilotada (<i>Remotely Piloted Aircraft</i>)
TCH	Toneladas de Cana por Hectare
VD	Volume Depositado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1 A Broca-da-cana (<i>Diatraea saccharalis</i>).....	15
3.1.1 Monitoramento e nível de controle.....	15
3.1.2 A cultivar RB86-7515 e sua suscetibilidade	17
3.2 Tecnologia de Aplicação de Defensivos.....	18
3.2.1 Espectro de gotas e cobertura do alvo	18
3.3 Uso de Drones na Pulverização Agrícola.....	19
3.3.1 Desafios do volume de calda em drones.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Caracterização da Área Experimental	21
4.1.1 Material vegetal e tratos culturais	21
4.2 Equipamento de Pulverização	22
4.3 Avaliações da Tecnologia de Aplicação	23
4.3.1 Espectro de gotas e cobertura (papel hidrossensível)	24
4.3.2 Deposição da calda (espectrofotometria)	25
4.4 Avaliação da Eficácia Agronômica e Produtividade	26
4.4.1 Tratamentos inseticidas e momento de aplicação	27
4.4.2 Levantamento de infestação e cálculo de eficiência.....	29
4.4.3 Estimativa de produtividade (TCH)	31
4.5 Análise Estatística	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 Caracterização dos Tratamentos.....	32
5.2 Parâmetros Físicos da Pulverização	32
5.3 Eficiência de Controle e Influência Climática	35
5.4 Monitoramento	37
5.5 Incidência de Doenças Associadas	39
5.6 Infestação Final e Produtividade (TCH)	40
6. CONCLUSÃO	41
7. REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) ocupa posição de destaque no Brasil, desempenhando papel crucial no agronegócio nacional, tanto para a produção de açúcar quanto para a geração de etanol e bioenergia (Figueiredo *et al.*, 2015). O país lidera a produção mundial, concentrando grande parte da oferta global em seu território (FAO, 2021). Na safra 2023/2024, a produção brasileira atingiu a marca histórica de 713,2 milhões de toneladas, cultivadas em 8,3 milhões de hectares, com o Estado de São Paulo respondendo por 54% de toda a produção nacional (CONAB, 2024).

Apesar do elevado potencial produtivo, a cultura enfrenta desafios fitossanitários significativos. Entre as diversas espécies de insetos-praga, a broca-da-cana, *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae), destaca-se como uma das mais relevantes, capaz de reduzir a produtividade em até 20% quando o índice de infestação atinge patamares críticos (Goebel; Sallam, 2011; Grimi *et al.*, 2018).

Os danos causados por *D. saccharalis* são severos e se iniciam na fase larval. Após a eclosão, as lagartas alimentam-se do parênquima foliar e, posteriormente, penetram no colmo, construindo galerias que reduzem a biomassa e podem causar a morte da gema apical ("coração morto") em plantas jovens (Gallo *et al.*, 2002). Além dos danos diretos, os prejuízos indiretos são agravados pela entrada de fungos oportunistas, como *Colletotrichum falcatum* e *Fusarium moniliforme*, causadores da Podridão Vermelha. Esses patógenos invertem a sacarose, reduzindo a pureza do caldo e provocando perdas industriais significativas na fermentação alcoólica e cristalização do açúcar (Sathyabhama *et al.*, 2016).

Para o manejo dessa praga, o controle químico, quando realizado com base no monitoramento e antes da penetração da lagarta no colmo, pode ser uma ferramenta importante no manejo integrado da praga. (Wilson *et al.*, 2022). Tradicionalmente, a aplicação terrestre em estádios avançados da cultura torna-se inviável devido à altura das plantas e aos danos por amassamento. Nesse cenário, a aplicação aérea por drones (RPA - Remotamente Pilotados) surge como uma tecnologia promissora, oferecendo flexibilidade operacional, ausência de amassamento e facilidade logística em comparação à aviação agrícola convencional (Shan *et al.*, 2021; Cunha *et al.*, 2024).

No entanto, a adoção massiva dessa tecnologia no setor sucroenergético, especialmente no Oeste Paulista, carece de validação científica robusta. Estudos sobre parâmetros operacionais ideais para drones em cana-de-açúcar são escassos, devido à complexidade experimental que exige grandes parcelas e infraestrutura específica (Qin *et al.*, 2016). Dentre as variáveis operacionais, o volume de aplicação é crítico, pois influencia diretamente a cobertura do alvo, a deposição da calda e a eficiência final do controle (Wang *et al.*, 2019; Chechi *et al.*, 2020).

Embora a capacidade de carga dos drones venha aumentando, razões econômicas limitam as aplicações a volumes reduzidos (10 a 15 L ha⁻¹). Diante disso, surge o problema de pesquisa que norteia este trabalho: a redução do volume de calda para níveis operacionais economicamente viáveis compromete a qualidade da deposição e a eficácia do controle da broca em canaviais densos?

A hipótese inicial deste estudo é que volumes de aplicação muito reduzidos podem resultar em cobertura insuficiente para atingir a praga alojada em partes protegidas da planta, exigindo a identificação de um volume de equilíbrio que concilie rendimento operacional e eficácia agrônômica.

Diante desse cenário, a presente pesquisa justifica-se pela carência significativa de informações científicas sobre a aplicação de inseticidas com drones na cultura da cana-de-açúcar. Essa lacuna de conhecimento limita a definição de parâmetros operacionais ideais, como volume de aplicação, espectro de gotas e deposição da calda, fatores determinantes para a eficiência do controle de *D. saccharalis*.

Considerando a relevância econômica da cultura para o agronegócio brasileiro e o impacto produtivo causado por essa praga, torna-se essencial desenvolver e validar técnicas que aliem eficácia no controle, sustentabilidade ambiental e viabilidade operacional. Dessa forma, a otimização do uso de drones pode não apenas maximizar o retorno econômico, mas também contribuir para práticas agrícolas mais seguras, precisas e compatíveis com as demandas atuais do setor sucroenergético.

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a influência de diferentes volumes de aplicação utilizando um drone agrícola na qualidade da deposição da pulverização e na eficiência de controle de *Diatraea saccharalis*, conforme detalhado nos objetivos específicos no capítulo seguinte.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência de diferentes volumes de calda aplicados por meio de aeronave remotamente pilotada (drone) sobre a qualidade da deposição da pulverização e a eficiência no controle de *D. saccharalis* na cultura da cana-de-açúcar.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a densidade de gotas e a porcentagem de cobertura da pulverização em alvos artificiais (papel hidrossensível) utilizando quatro volumes de aplicação (10, 15, 20 e 25 L ha⁻¹);
- Quantificar a deposição da calda de pulverização na cultura por meio de traçador (corante Azul Brilhante) e análise por espectrofotometria;
- Analisar a uniformidade de distribuição da calda aplicada pelo drone DJI Agras T40 através do coeficiente de variação dos depósitos;
- Avaliar a eficiência agronômica dos diferentes volumes de aplicação no controle da infestação de broca-da-cana (*D. saccharalis*) em condições de campo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

A fundamentação teórica deste trabalho aborda a biologia da praga alvo, os danos causados à cultura da cana-de-açúcar e os princípios da tecnologia de aplicação que sustentam o uso de drones agrícolas para a pulverização em baixo volume.

3.1 A Broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*)

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é sujeita ao ataque de diversas pragas, sendo a broca-da-cana, *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae), a de maior relevância econômica no Brasil. Segundo Gallo *et al.* (2002), o ciclo da praga inicia-se com a ovipostura nas folhas e, após a eclosão, as lagartas de primeiro ínstar alimentam-se do parênquima foliar antes de penetrarem no colmo, onde completam seu desenvolvimento larval protegidas da ação de inseticidas de contato.

Os danos ocasionados são classificados em diretos e indiretos. O dano direto resulta da construção de galerias longitudinais no colmo, que promovem a perda de biomassa e a morte da gema apical ("coração morto"). Contudo, os danos indiretos são frequentemente mais impactantes para a agroindústria.

As galerias abertas pelas lagartas predispõem o colmo à infecção por microrganismos oportunistas, como os fungos *Colletotrichum falcatum* e *Fusarium moniliforme*. Estes patógenos causam a podridão-vermelha, invertendo a sacarose em glicose e frutose, o que reduz a pureza do caldo e a eficiência industrial na produção de açúcar e etanol (Miranda, 2014, p. 32).

A correlação entre infestação e prejuízo é linear. Botelho e Macedo (2002, p. 11) estimam que "para cada 1% de intensidade de infestação final, ocorre uma redução média de 1,14% na produtividade de colmos (TCH) e 0,42% na produção de açúcar".

3.1.1 Monitoramento e nível de controle

Para mitigar os prejuízos causados pela broca-da-cana, o monitoramento populacional constitui a base do Manejo Integrado de Pragas (MIP), permitindo a tomada de decisão fundamentada quanto ao momento ideal de intervenção. O

levantamento da intensidade de infestação possibilita identificar a necessidade de controle, evitando tanto aplicações desnecessárias quanto intervenções tardias, que apresentam baixa eficiência (Parra *et al.*, 2002; Pinto *et al.*, 2006).

O método tradicional de monitoramento consiste na amostragem direta de colmos, com a avaliação da presença de lagartas, galerias ou sintomas característicos do ataque. A partir desses dados, calcula-se o Índice de Intensidade de Infestação (I.I.I.), utilizado como referência para a tomada de decisão. Segundo Pinto *et al.* (2006), o Nível de Controle (NC) para *Diatraea saccharalis* situa-se, de maneira geral, entre 1% e 3% de intensidade de infestação, podendo variar em função da variedade, do sistema de produção e do destino industrial da cana.

No entanto, a amostragem direta apresenta limitações operacionais, especialmente em áreas extensas e em estádios avançados da cultura, nos quais o acesso ao interior do dossel é dificultado. Nesse contexto, o uso de armadilhas com feromônio sexual tem se consolidado como ferramenta complementar de monitoramento, permitindo a detecção da presença de adultos e o acompanhamento da dinâmica populacional da praga (Bento *et al.*, 2016).

As armadilhas de feromônio atuam por meio da liberação de compostos sintéticos que mimetizam o feromônio sexual das fêmeas, atraindo machos adultos. A captura desses indivíduos fornece informações importantes sobre a ocorrência de revoadas e o início de ciclos reprodutivos no campo. De acordo com Parra *et al.* (2002), a presença de machos em armadilhas indica atividade reprodutiva e, consequentemente, potencial de oviposição nas plantas, sendo um indicativo precoce do risco de infestação.

Diversos estudos têm buscado estabelecer relações entre a captura de adultos e a intensidade de infestação larval. Assis *et al.* (2022) demonstraram que a captura de machos pode ser utilizada como variável preditiva da ocorrência de danos na cultura, especialmente quando associada a variáveis climáticas. Entretanto, os autores destacam que essa relação não é linear e pode apresentar elevada variabilidade em função de fatores ambientais, como temperatura, umidade relativa e estágio fenológico da cultura.

Nesse sentido, Carbognin *et al.* (2025) observaram que existe uma defasagem temporal entre os picos de captura de adultos e o aumento da infestação larval, podendo esse intervalo atingir várias semanas. Esse comportamento indica que a

captura de adultos representa um indicador antecipado de risco, e não uma medida direta da intensidade de infestação no momento da avaliação.

Adicionalmente, estudos conduzidos por Vargas *et al.* (2015) destacam que a dinâmica populacional de *Diatraea spp.* é fortemente influenciada por condições ambientais e pela disponibilidade de hospedeiros, o que pode afetar a correlação entre captura de adultos e níveis de dano. Assim, a interpretação dos dados provenientes de armadilhas deve ser realizada de forma integrada com outros métodos de monitoramento.

Dessa forma, embora as armadilhas de feromônio sejam ferramentas eficientes para detectar a presença da praga e acompanhar sua flutuação populacional, sua utilização isolada não é suficiente para a tomada de decisão quanto ao controle. Conforme enfatizado por Bento *et al.* (2016), a adoção de medidas de manejo deve considerar a integração entre captura de adultos, amostragem direta da infestação, histórico da área e condições ambientais, garantindo maior precisão na definição do momento de intervenção.

A estreita “janela de controle” da broca-da-cana, caracterizada pela vulnerabilidade das lagartas nos primeiros ínstaes antes da penetração no colmo, reforça a importância de sistemas de monitoramento eficientes e integrados. Nesse contexto, o uso combinado de armadilhas de feromônio e amostragem de campo permite maior acurácia na identificação do momento ideal de controle, contribuindo para a eficiência das aplicações e para a sustentabilidade do sistema produtivo.

3.1.2 A cultivar RB86-7515 e sua suscetibilidade

A variedade RB86-7515 (também registrada como RB867515) é uma das mais cultivadas no Brasil, devido ao seu elevado potencial produtivo e ampla adaptação edafoclimática. Contudo, sua relação com a praga broca-da-cana (*D. saccharalis*) ainda carece de informações científicas conclusivas.

Em estudos de campo conduzidos no estado do Mato Grosso do Sul, avaliando o comportamento de variedades de cana-planta e soca, observou-se que a RB86-7515 não foi destacada como uma das mais resistentes nem como uma das mais suscetíveis, sugerindo um comportamento intermediário quanto ao ataque da praga (Camillo, 2010)

Outro estudo avaliou a intensidade de infestação artificial de *D. saccharalis* em variedades, incluindo RB86-7515, em diferentes épocas de colheita. Os resultados

demonstraram que os impactos na qualidade tecnológica e na produtividade variaram de acordo com a intensidade da infestação e a época, indicando que a suscetibilidade da cultivar pode ser influenciada por fatores ambientais e de manejo (UFG, 2017).

De forma geral, a literatura aponta que a RB86-7515 apresenta suscetibilidade intermediária à broca-da-cana. No entanto, fatores como a idade de corte, a intensidade de infestação e as condições locais de cultivo podem influenciar fortemente sua resposta à praga, ressaltando a importância do manejo integrado.

3.2 Tecnologia de Aplicação de Defensivos

O sucesso no controle fitossanitário não se restringe à escolha da molécula inseticida correta, mas está intrinsecamente ligado à capacidade de depositar este produto no local onde a praga se encontra. A definição clássica deste conceito é dada por Matuo (1990, p. 2):

Tecnologia de aplicação de defensivos é o emprego de todos os conhecimentos científicos e técnicos para a correta colocação do produto biologicamente ativo no alvo, em quantidade necessária, de forma econômica e com o mínimo de contaminação ambiental.

Em culturas de porte alto e fechamento denso, como a cana-de-açúcar em estádios avançados, a barreira física imposta pelas folhas dificulta a penetração das gotas até as partes inferiores do dossel. Nestas condições, o uso de equipamentos terrestres tratorizados torna-se inviável devido aos danos mecânicos (amassamento) causados à cultura.

Para superar essas limitações logísticas, a aplicação aérea consolidou-se como ferramenta indispensável. Conforme Antuniassi *et al.* (2019, p. 58), "a aviação agrícola permite a realização de tratamentos em grandes áreas num curto intervalo de tempo (timeliness), garantindo que a praga seja controlada no momento de maior suscetibilidade". Contudo, a qualidade desta aplicação depende do ajuste fino dos parâmetros operacionais para mitigar riscos de deriva.

3.2.1 Espectro de gotas e cobertura do alvo

A interação entre o volume de calda e o tamanho das gotas define a qualidade da cobertura. Para o controle de *Diatraea saccharalis*, que muitas vezes se abriga na bainha das folhas, é necessário um alto índice de cobertura (densidade de gotas).

A literatura agronômica estabelece parâmetros claros para essa relação. Cunha (2011) destaca que a redução do volume de calda exige, obrigatoriamente, a redução do diâmetro das gotas para manter a mesma cobertura superficial. No entanto, gotas muito finas (menores que 100 μm) são extremamente voláteis e suscetíveis à deriva.

Sobre a importância da densidade de impactos para a eficácia biológica, Chaim (2009, p. 25) afirma:

Para inseticidas de contato, a distribuição do produto sobre a superfície foliar deve ser a mais uniforme possível. Recomenda-se, para o controle de lagartas, uma densidade mínima de 30 a 40 gotas por cm^2 para garantir que o inseto entre em contato com a dose letal durante sua locomoção sobre a planta.

Portanto, o desafio da tecnologia de aplicação aérea, especialmente com volumes reduzidos, é gerar um espectro de gotas que equilibre a necessidade de cobertura com a necessidade de redução de deriva.

3.3 Uso de Drones na Pulverização Agrícola

A introdução das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) na agricultura representa uma mudança de paradigma na aplicação de defensivos. Diferente da aviação agrícola tripulada, os drones permitem voos em altitudes extremamente baixas e em áreas de topografia complexa, onde aviões ou tratores não operam com segurança.

Segundo Jorge e Inamasu (2014, p. 108), a principal contribuição desta tecnologia é a capacidade de realizar aplicações de precisão em reboleiras, reduzindo o custo operacional e o impacto ambiental. Além disso, a eliminação do contato físico da máquina com a planta preserva a integridade do canavial.

Uma característica física distinta dos drones de asas rotativas (multirrotores) é o efeito do deslocamento de ar gerado pelas hélices, conhecido como *downwash*.

O fluxo de ar descendente provocado pelos rotores movimenta a folhagem da cultura, facilitando a penetração das gotas no dossel inferior. Esse efeito é particularmente benéfico em culturas densas como a cana-de-açúcar, onde o alvo biológico muitas vezes encontra-se protegido nas partes baixas da planta (Carvalho; Hirakuri, 2020, p. 22).

Este efeito aerodinâmico é um dos diferenciais que justifica o uso do equipamento DJI Agras T40 testado neste trabalho, que utiliza múltiplos rotores para maximizar essa turbulência benéfica.

3.3.1 Desafios do volume de calda em drones

Apesar das vantagens aerodinâmicas, a operação com drones enfrenta uma limitação física severa: a capacidade de carga das baterias e do tanque de insumos. Para tornar a operação economicamente viável, é mandatório reduzir a taxa de aplicação (L ha^{-1}).

Entretanto, a redução drástica do volume impõe riscos. A literatura clássica de tecnologia de aplicação alerta para o compromisso entre volume e cobertura. Conforme explica Antuniassi (2015, p. 49):

A redução do volume de calda para níveis de ultra baixo volume ($< 10 \text{ L ha}^{-1}$) exige o fracionamento em gotas muito finas para manter a cobertura. Se o diâmetro das gotas não for ajustado corretamente, há risco de evaporação antes de atingir o alvo ou deriva exógena, resultando em falha de controle.

Portanto, a determinação do volume ideal não é apenas uma questão logística, mas agrônômica. É necessário encontrar um ponto de equilíbrio onde o volume seja baixo o suficiente para garantir a autonomia da bateria, mas alto o suficiente para garantir o controle efetivo da broca.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são detalhados os procedimentos metodológicos adotados para a realização do estudo, incluindo a caracterização da área experimental, a descrição dos tratamentos e equipamentos utilizados, bem como os métodos de coleta e análise dos dados físicos e biológicos.

4.1 Caracterização da Área Experimental

O experimento foi conduzido na safra agrícola 2023/2024, em área comercial pertencente à Usina Viterro Bioenergia S.A. – Unidade Rio Vermelho, localizada na Estrada Municipal Junqueirópolis (Fazenda Alvorada), no município de Junqueirópolis, estado de São Paulo.

A área experimental situa-se nas coordenadas geográficas 21°28'35" S e 51°24'04" O, com altitude média de 354 metros e topografia levemente ondulada. O clima da região é classificado como Aw (Tropical de Savana), segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos. A região apresenta temperatura média anual de 22,5 °C e precipitação pluviométrica média anual de 1208 mm.

4.1.1 Material vegetal e tratamentos culturais

Foi utilizada a variedade de cana-de-açúcar RB86 7515, amplamente cultivada no Brasil devido à sua rusticidade, boa adaptabilidade a diferentes ambientes de produção e elevada produtividade de colmos e de açúcar (Landell *et al.*, 2013). O plantio foi realizado com espaçamento de 1,5 m entre os sulcos, arranjo que favorece a interceptação de luz e o manejo mecanizado (Santos *et al.*, 2015).

Os experimentos foram iniciados quando as plantas atingiram cerca de 1 metro de altura, estágio onde os ataques de *Diatraea saccharalis* costumam se intensificar.

O histórico da área inclui a rotação de culturas com amendoim (*Arachis hypogaea*) na reforma do canavial, prática que contribui para a fixação biológica de nitrogênio e melhoria das condições do solo (Barbosa *et al.*, 2019). Previamente ao plantio, realizou-se a correção da acidez do solo por calagem e a adubação de base conforme análise de solo, garantindo o fornecimento equilibrado de nutrientes

essenciais. Mudas sadias e livres de pragas foram utilizadas para assegurar um estande uniforme.

Todas as informações referentes ao histórico e manejo da área foram fornecidas pelo departamento técnico da Usina Viterra.

4.2 Equipamento de Pulverização

As aplicações foram realizadas utilizando uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) modelo DJI Agras T40 (Figura 1). Este equipamento possui estrutura de rotor coaxial duplo equipado com hélices de 54 polegadas de diâmetro. Conta ainda com radar omnidirecional de matriz faseada ativo e sistema de visão binocular, recursos que permitem a detecção de obstáculos e a simulação de voo em terrenos complexos, garantindo maior estabilidade operacional.

Figura 1. Drone DJI Agras T40 usado na condução do experimento



Fonte: Elaborada pelo autor.

As principais especificações técnicas do equipamento utilizado estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros técnicos do drone de pulverização DJI Agras T40.

Principais parâmetros	Normas e números
Modelo	DJI T40
Tamanho da fuselagem	2.800 mm × 3.150 mm × 780 mm
Volume do tanque de pulverização	40 L
Tipo de bico	LX8060SZ
Número de bicos	2
Velocidade máxima de operação	7 m s ⁻¹
Taxa máxima de fluxo	0-6 L min ⁻¹
Máxima largura da faixa de aplicação	11m (altura 6,0 m e velocidade 7,77ms ⁻¹)
Tamanho da gota	50-500 µm

Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema de pulverização utiliza atomizadores rotativos centrífugos (bicos LX8060SZ), capazes de gerar gotas com diâmetro ajustável entre 50 e 500 µm, essenciais para os diferentes volumes de calda testados neste estudo.

4.3 Avaliações da Tecnologia de Aplicação

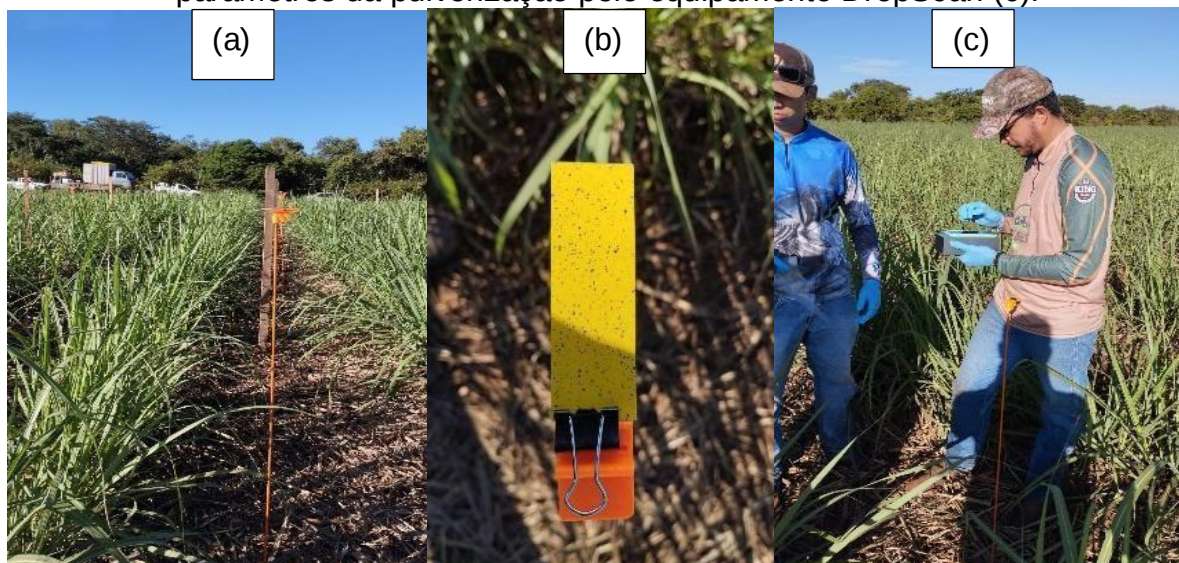
A qualidade da pulverização foi avaliada por métodos qualitativos e quantitativos, utilizando papéis hidrossensíveis e traçador químico, respectivamente. O experimento seguiu o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) com 4 tratamentos (volumes de 10, 15, 20 e 25 L ha⁻¹) e 12 repetições.

As parcelas experimentais possuíam dimensões de 33 x 100 m. As aplicações foram realizadas mantendo-se os parâmetros operacionais constantes: altura de voo de 5,5 m em relação ao dossel, velocidade de deslocamento de 25 km h⁻¹ e faixa de aplicação efetiva de 10 m. O sistema de atomização foi configurado para gerar gotas com diâmetro aproximado de 300 µm, padrão comercialmente utilizado para o controle de broca.

4.3.1 Espectro de gotas e cobertura (papel hidrossensível)

Para determinar o espectro de gotas, foram distribuídos papéis hidrossensíveis, ou seja, papel sensível à água (PSA), com dimensões de 76 x 26 mm. Os papéis foram distribuídos na entrelinha central de cada parcela, fixados horizontalmente em hastes metálicas posicionadas nas entrelinhas da cultura, ligeiramente acima do dossel, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Esquema da disposição dos papéis hidrossensíveis nas parcelas experimentais (a). Papel sensível a água após a pulverização (b). Análise dos parâmetros da pulverização pelo equipamento DropScan (c).



Fonte: Do autor.

Durante as aplicações, as condições meteorológicas (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) foram monitoradas para garantir que estivessem dentro dos limites ideais. Após a pulverização (realizada apenas com água neste ensaio específico), os papéis foram recolhidos, digitalizados e processados no software DropScan, obtendo-se os parâmetros: Densidade de gotas (impactos cm⁻²), Cobertura (%), DMV e PRD (Potencial Risco de Deriva).

4.3.2 Deposição da calda (espectrofotometria)

A quantificação do volume depositado pela pulverização foi realizada em experimento independente, utilizando a mesma configuração experimental. Os alvos artificiais utilizados foram Placas de Petri de vidro (12 cm de diâmetro x 2 cm de altura), posicionadas em estacas de madeiras e fixadas com uso de fita 3m dupla face conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3. Disposição das Placas de Petri.



Fonte: Do autor.

A calda foi preparada com água e corante alimentício Azul Brilhante FCF na concentração de $2,0 \text{ g L}^{-1}$. Após a pulverização e secagem, as placas foram recolhidas, protegidas da luz e levadas ao laboratório. Para a recuperação do traçador, adicionou-se 11,4 mL de água destilada em cada placa para lavagem. A solução obtida foi analisada em espectrofotômetro no comprimento de onda de 630 nm (Prado *et al.*, 2015).

O volume retido nos alvos (V_i) foi calculado pela Equação 1:

$$V_i = \frac{C_f \times V_f}{C_i}$$

Em que:

- V_i = volume retido em mL (placa de Petri);
- C_f = concentração detectada no espectrofotômetro (mg L⁻¹);
- V_f = volume de diluição da amostra (mL);
- C_i = concentração inicial na solução de aplicação (mg L⁻¹).

O volume retido nas placas em mL, foi dividido pela área da placa e convertido em mL m⁻². Após esse procedimento, realizou-se a correção para g de corante ha⁻¹, considerando como referência uma dose teórica de 500 g de corante (Azul Brilhante) por hectare. Essa normalização foi necessária para permitir a comparação direta e igualitária entre os tratamentos, uma vez que foram aplicados volumes de calda distintos (10, 15, 20 e 25 L ha⁻¹).

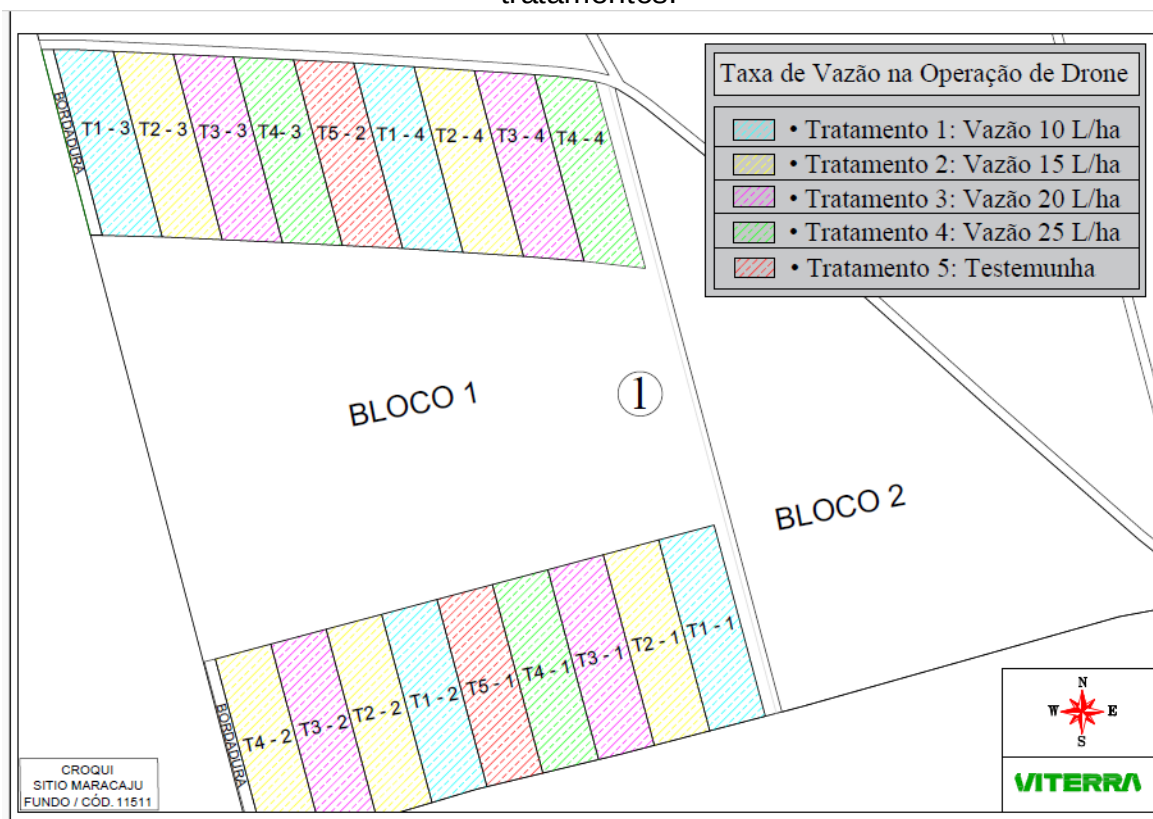
A porcentagem de recuperação (PR) foi determinada com base na relação entre o volume de calda efetivamente depositado nos alvos e o volume teórico aplicado por unidade de área. Inicialmente, o volume depositado (VD) foi obtido por meio da quantificação espectrofotométrica do corante Azul Brilhante recuperado das placas de Petri, considerando o volume de diluição e a concentração detectada. Em seguida, esse volume foi normalizado para a unidade de área (L ha⁻¹). A porcentagem de recuperação foi então calculada pela razão entre o volume depositado e o volume aplicado em cada tratamento, conforme a equação:

$$PR (\%) = (\text{Volume depositado} / \text{Volume aplicado}) \times 100$$

4.4 Avaliação da Eficácia Agronômica e Produtividade

O experimento de controle químico foi conduzido em Delineamento de Blocos Casualizado (DBC) com 5 tratamentos e 4 repetições. O tratamento Testemunha (sem aplicação) foi mantido em apenas duas parcelas grandes, com amostragem duplicada, para minimizar riscos de danos econômicos à usina. A disposição espacial das parcelas no talhão é apresentada na Figura 4.

Figura 4. Croqui experimental demonstrando a disposição das parcelas e tratamentos.



Fonte: Imagem fornecida pela Usina Viterra.

4.4.1 Tratamentos inseticidas e momento de aplicação

As parcelas experimentais tiveram dimensões de 33 m de largura (correspondendo a 3 passadas da aeronave) por 100 m de comprimento, totalizando 3.300 m² cada.

O manejo químico consistiu em duas aplicações sequenciais. A primeira utilizou o inseticida Altacor® (clorantianiliprole 350 g kg⁻¹) na dose de 60 g ha⁻¹. A segunda aplicação empregou Ampligo® (clorantianiliprole + lambda-cialotrina) na dose de 200 mL ha⁻¹ (Figura 5). Ambas as aplicações testaram os volumes de 10, 15, 20 e 25 L ha⁻¹, mantendo-se uma Testemunha absoluta sem inseticida.

Figura 5. Pesagem da quantidade de produto indicado pela bula para aplicação nos tratamentos (a). Adição da calda ao tanque do drone (b).



Fonte: Do autor.

A decisão do momento de aplicação (*timing*) seguiu rigorosamente os parâmetros de monitoramento adotados pela usina. A instalação de armadilhas com feromônio sexual foi utilizada para monitorar a flutuação populacional da broca. Esse procedimento é amplamente recomendado em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP), uma vez que a captura de machos adultos serve como indicativo do nível populacional na área e do risco iminente de postura de ovos nas plantas (Parra *et al.*, 2002; Bento *et al.*, 2016).

As armadilhas instaladas nas bordas opostas do talhão indicaram índices de adultos aceitáveis para o início das pulverizações. Na primeira instalação, foram quantificados 6 adultos em uma armadilha e 12 na outra. Já na segunda avaliação, realizada aproximadamente dois meses após a primeira aplicação, foram encontrados 37 adultos no total (soma das duas armadilhas), desencadeando a segunda intervenção química (Figura 6).

Figura 6. Armadilha de feromônio utilizada para monitoramento da população de adultos.



Fonte: Do autor.

Durante as aplicações, as condições meteorológicas foram monitoradas localmente, registrando-se temperaturas médias entre 32°C e 35°C e umidade relativa entre 25% (1ª aplicação - condição crítica) e 60% (2ª aplicação - condição ideal).

4.4.2 Levantamento de infestação e cálculo de eficiência

Os levantamentos para avaliação da população da broca após a pulverização foram realizados em três pontos por parcela, com 10 plantas por ponto, totalizando 120 plantas amostradas em cada tratamento. As amostragens concentraram-se na parte central das parcelas para evitar o efeito de bordadura. Foram avaliadas as bainhas das 3ª e 4ª folhas próximas ao palmito, onde se encontram os entrenós mais jovens, região preferencial de ataque inicial da praga (Silva, 2021) (Figura 7).



Fonte: Do autor.

Com os dados obtidos em campo, calculou-se primeiramente o Índice de Intensidade de Infestação (I.I.I.) para cada tratamento, conforme a Equação 2:

$$I.I.I(\%) = \frac{n^{\circ} \text{ total de internódios avaliados}}{n^{\circ} \text{ de internódios broqueados}} \times 100$$

A interpretação do I.I.I. está diretamente ligada ao Nível de Dano Econômico (NDE). A literatura estabelece que a broca-da-cana causa perdas significativas mesmo em baixas infestações. Estudos clássicos estimam que para cada 1% de I.I.I., ocorrem perdas de aproximadamente 1,50% na produção de cana (TCH), 0,49% na produção de açúcar e 0,28% na produção de etanol (Arrigoni; Macedo; Botelho, 2004). O Nível de Controle (NC) é frequentemente estabelecido entre 1% a 3% de I.I.I. (Pinto *et al.*, 2006).

Após a determinação da infestação, foi calculada a eficiência agrônômica dos tratamentos pela fórmula de Abbott (1925), conforme a Equação 3:

$$EC(\%) = \frac{TC - Ti}{Tc} \times 100$$

- EC = Eficiência de controle (%);
- TC = Número de plantas atacadas na Testemunha (Controle);
- TI = Número de plantas atacadas no Tratamento com inseticida.

4.4.3 Estimativa de produtividade (TCH)

A avaliação da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) nos diferentes tratamentos foi realizada por meio de biometria em campo. Inicialmente, em cada talhão foram selecionados três pontos ao acaso, nos quais se demarcaram 10 metros da linha de plantio para a contagem do número de perfilhos presentes. As três contagens foram utilizadas para calcular a média de perfilhos por 10 metros.

Em seguida, procedeu-se à determinação da massa. Para isso, foram cortados 20 colmos por ponto amostral (totalizando três repetições), sendo pesados imediatamente para obtenção do peso fresco.

Para o cálculo final, considerou-se o espaçamento de plantio (1,5 m) para estimar o número de metros existentes em um hectare (6.666 m). Por meio de regra de três simples, converteu-se a contagem inicial para a estimativa de perfilhos totais por hectare. Por fim, multiplicando-se a população estimada pelo peso médio dos colmos, obteve-se a produtividade final em Toneladas de Cana por Hectare (TCH) para cada tratamento.

4.5 Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). O software estatístico utilizado foi o AgroEstat.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no experimento demonstram a interação entre os parâmetros da tecnologia de aplicação aérea, as condições edafoclimáticas e a eficiência biológica no controle da broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*). A seguir, são apresentados os dados referentes aos tratamentos, à qualidade física da pulverização, à eficácia agrônômica e à produtividade.

5.1 Caracterização dos Tratamentos

A área experimental foi dividida em parcelas para comportar os quatro volumes de aplicação testados, visando explorar o limite operacional do equipamento e conciliar autonomia de voo com eficácia de controle. A Tabela 2 detalha os tratamentos utilizados. Os volumes definidos (10, 15, 20 e 25 L ha⁻¹) verificou-se a viabilidade técnica da redução da taxa de aplicação sem prejuízo ao controle fitossanitário.

5.2 Parâmetros Físicos da Pulverização

A análise dos parâmetros da tecnologia de aplicação é essencial para compreender como o volume de calda interfere na cobertura do alvo. As condições climáticas no momento da aplicação com drone para avaliação dos parâmetros da pulverização foram consideradas dentro dos limites operacionais para tecnologia de aplicação aérea. O clima da região é classificado como Aw (tropical), caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos secos. Durante a execução das pulverizações, registraram-se temperaturas médias de 35 ± 2 °C, umidade relativa do ar de 55 ± 3% e velocidade máxima do vento de 3 km h⁻¹. Os dados obtidos para densidade de gotas, cobertura e deposição estão na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da pulverização (Gotas, Cobertura, DMV, Volume Depositado) em função dos volumes de aplicação.

Volume aplicação (L ha ⁻¹)	Gotas cm ⁻²	% cobertura	DMV (µm)	VD (L ha ⁻¹)	AR	PRD	PR (%)
10	23	2,6	256 c	9 c	0,79 c	3,9 b	70
15	30	3,7	271 bc	15 ab	0,96 b	4,3 ab	79
20	32	4,0	299 ab	16 ab	1,00 ab	5,3 ab	63
25	32	4,2	329 a	19 a	1,14 a	5,4 a	96
P	0,26	0,06	<0,01	0,02	<0,01	0,02	0,17
F	1,40	2,67	8,67	3,78	10,29	3,71	1,78
CV	20,8	19,5	6,48	24,5	5,27	12,6	23,8

Fonte :Elaborada pelo autor.

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas. VD: Volume depositado. AR: Amplitude relativa. PRD: Potencial risco de deriva. PR: Porcentagem de recuperação.

Ao analisar a Tabela 2 é observado nos volumes de 10 e 15 L ha⁻¹, que houve um aumento de 30% no número de gotas/cm² (de 23 para 30 gotas/cm²) e 42% na cobertura (de 2,6% para 3,7%). No entanto, à medida que o volume continuou a ser elevado (de 15 para 25 L ha⁻¹), os ganhos relativos passaram a ser menores: a densidade de gotas aumentou apenas 6,7% (de 30 para 32 gotas/cm²), e a cobertura aumentou 13,5% (de 3,7% para 4,2%).

Esses dados evidenciam um comportamento de saturação, compatível com uma curva de crescimento logarítmico, indicando que os maiores incrementos ocorrem nas faixas iniciais de volume aplicado. Esse padrão reforça que, apesar de volumes maiores promoverem melhoria na deposição, o ganho marginal tende a diminuir, sendo necessário considerar a relação custo-benefício e o tipo de produto utilizado (sistêmico vs. contato) na definição do volume ideal de aplicação.

Zhang *et al.* (2020), observaram que o aumento do volume, mesmo sob condições fixas de voo e pontas, eleva a densidade de gotas na superfície alvo, favorecendo a cobertura. O diâmetro médio volumétrico (DMV) aumentou significativamente com o aumento do volume de aplicação, variando de 256 µm a 329 µm. Esse padrão é coerente com as conclusões de Wang *et al.* (2019), que relataram aumento no DMV com volumes superiores a 20 L ha⁻¹ em aplicações com drones, especialmente quando mantidas as mesmas pontas e altura de voo. O volume depositado sobre os alvos também apresentou diferença significativa, passando de 9 L ha⁻¹ quando pulverizado com volume de 10 L ha⁻¹ para 19 L ha⁻¹ no de 25 L ha⁻¹.

A maior deposição nos tratamentos com maiores volume de aplicação está associada a melhor cobertura, aspecto fundamental para o controle eficiente de

pragas e doenças. Conforme Huang *et al.* (2009), o incremento da deposição com volumes mais altos é esperado, desde que a velocidade do drone, altura de voo e pontas sejam mantidas, como no presente estudo. A amplitude relativa (AR), parâmetro que mede a uniformidade do espectro de gotas, variou entre 0,79 e 1,14 aumentando significativamente conforme aumentou o volume de aplicação. Embora o valor mais elevado (tratamento de 25 L ha⁻¹) indique maior variabilidade no tamanho das gotas, ele ainda se encontra dentro de faixas operacionais aceitáveis para aplicações com VANTs, segundo Li *et al.* (2023), que indicam valores de AR inferiores a 1,2 como adequados à boa uniformidade de deposição.

O potencial de risco de deriva (PRD) variou de 3,9 a 5,4, sendo significativamente maiores com o aumento do volume de aplicação. Isso provavelmente está relacionado com o aumento da amplitude relativa conforme é aumentado o volume de aplicação nos tratamentos, elevando a quantidade e a variabilidade do tamanho de gotas formadas, tornando um risco de deriva maior com o aumento do volume de aplicação. Ainda assim, os valores encontrados mantêm-se abaixo de faixas críticas para risco ambiental.

A porcentagem de recuperação (PR) foi determinada a partir da quantificação do corante Azul Brilhante recuperado nas placas de Petri, representando a fração da calda pulverizada efetivamente coletada pelos alvos artificiais. Esse método difere da estimativa de volume depositado obtida por meio dos papéis hidrossensíveis (DropScan), uma vez que se baseia em análise espectrofotométrica do corante extraído, permitindo maior precisão na quantificação do volume recuperado.

Os valores de PR não diferiram estatisticamente entre os volumes de aplicação testados, indicando comportamento semelhante de recuperação da calda entre os tratamentos. O maior valor foi observado no volume de 25 L ha⁻¹, com recuperação de 96%, evidenciando elevada eficiência operacional da aplicação.

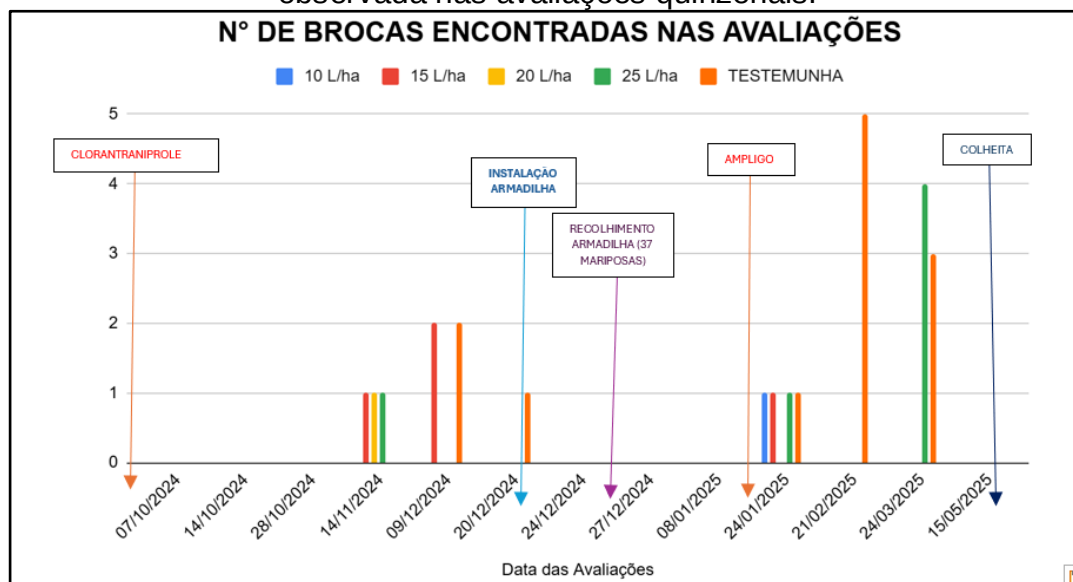
Esse resultado demonstra que, embora os parâmetros físicos da pulverização (como cobertura e densidade de gotas) apresentem comportamento de saturação, a recuperação da calda medida por traçador pode responder de forma distinta, sendo influenciada pela dinâmica de interceptação e retenção da calda nos alvos.

Resultados semelhantes foram reportados por Zhang *et al.* (2022), que observaram que volumes mais elevados de aplicação podem favorecer a recuperação da calda em alvos artificiais, mesmo sem incremento proporcional na cobertura.

5.3 Eficiência de Controle e Influência Climática

O monitoramento da praga ocorreu quinzenalmente e a flutuação populacional de *Diatraea saccharalis* na área experimental é apresentada no Figura 8.

Figura 8. Flutuação populacional de *Diatraea saccharalis* (número de brocas) observada nas avaliações quinzenais.



Fonte: Do autor.

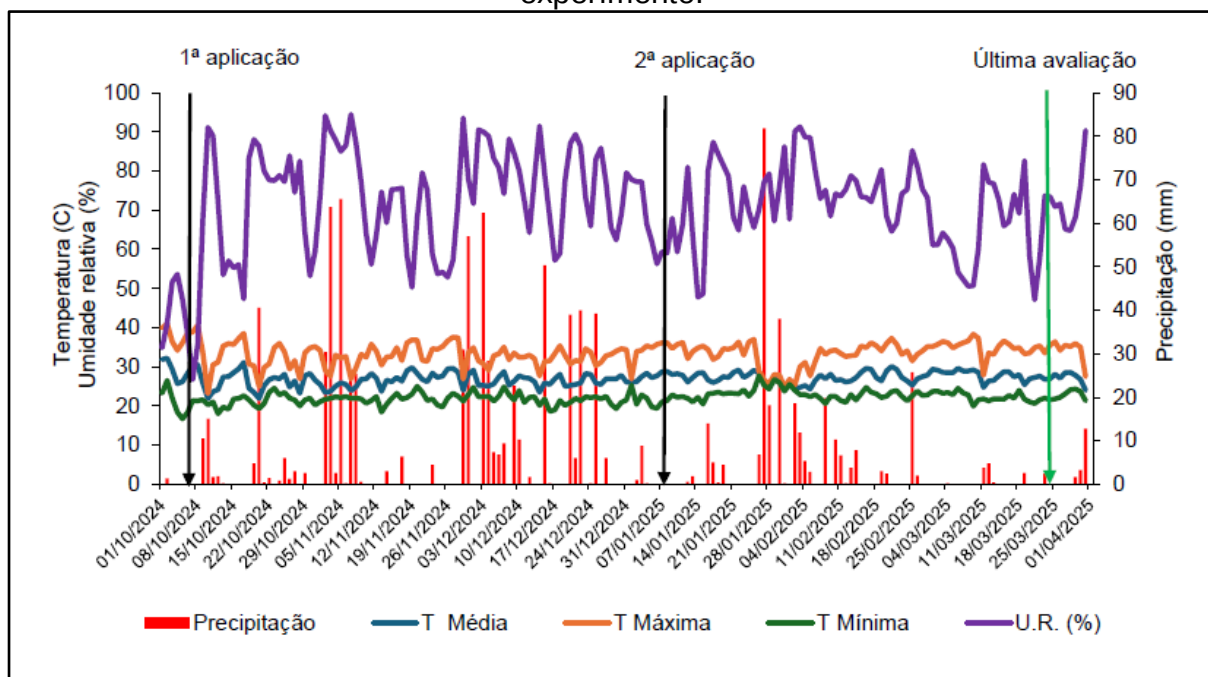
Durante a condução do experimento, a população de *D. saccharalis* apresentou-se em níveis relativamente baixos, inclusive nas parcelas testemunhas.

As avaliações evidenciaram que o índice de infestação natural foi inferior ao esperado, não atingindo os patamares críticos relatados na literatura (Goebel; Sallam, 2011).

Diversos fatores contribuíram para essa baixa pressão populacional. Primeiramente, o histórico da área com a variedade RB86-7515 (susceptibilidade intermediária) e a rotação com amendoim podem ter criado um ambiente menos favorável à praga.

Fundamentalmente, as condições climáticas adversas conforme revelam o Figura 9 impactaram a dinâmica do inseto.

Figura 9. Dados meteorológicos diários registrados em Dracena-SP durante o experimento.



Fonte: Estação Meteorológica da UNESP Câmpus de Dracena (2025).

A captura contínua de machos nas armadilhas de feromônio indicou a presença, a revoada e a movimentação de adultos de *D. saccharalis* na área experimental. Contudo, essa ocorrência não se traduziu em uma infestação larval efetiva e danosa no interior dos colmos, resultando em níveis de infestação muito baixos até mesmo nas parcelas testemunhas (sem aplicação). Este fenômeno, que impossibilitou a diferenciação estatística da eficiência biológica entre os volumes de calda aplicados, pode ser justificado pela forte influência das condições meteorológicas registradas durante a condução do ensaio.

Correlacionando os dados climáticos do período com as exigências ecofisiológicas da praga, nota-se que o desenvolvimento e o potencial reprodutivo da broca-da-cana são intrinsecamente dependentes da temperatura ambiente. De acordo com Melo e Parra (1988), o inseto encontra seu desenvolvimento ótimo e maior viabilidade (sobrevivência nas fases de ovo, lagarta e pupa) em temperaturas próximas a 30°C. No entanto, a exposição a temperaturas atingindo ou superando a marca de 32°C atua como um fator severamente restritivo e prejudicial ao ciclo biológico normal do lepidóptero.

Sob condições de estresse térmico em torno de 32°C, ocorre uma queda drástica na viabilidade das pupas, cuja taxa de emergência é reduzida para apenas

55,7%, acompanhada pela diminuição significativa na biomassa (peso) de ambos os sexos. Além da supressão das fases imaturas, as altas temperaturas afetam drasticamente a fase adulta e o sucesso reprodutivo da espécie. A longevidade dos adultos decresce agudamente com a elevação térmica, e a capacidade de oviposição das fêmeas é severamente inibida (sendo 20°C a temperatura ideal para máxima postura de ovos). Em regimes térmicos de 32°C, a mortalidade é tão elevada que a emergência de fêmeas viáveis se torna escassa, o que compromete a perpetuação da população no campo.

Dessa forma, conclui-se que os picos de temperatura e o calor excessivo evidenciados nos dados meteorológicos atuaram como um fator de supressão populacional natural. Embora os machos estivessem presentes e fossem capturados no monitoramento, o estresse climático provavelmente reduziu a longevidade dos adultos, inibiu o sucesso no acasalamento e derrubou as taxas de oviposição das fêmeas. Além disso, as altas temperaturas possivelmente inviabilizaram a eclosão dos ovos e causaram a mortalidade das lagartas de primeiros ínstaes por dessecação no parênquima foliar, antes que estas conseguissem penetrar e se abrigar no interior dos colmos. Esse controle natural promovido pelo clima justifica, de forma contundente, a ausência de danos nas testemunhas e a baixa pressão da praga durante o projeto.

5.4 Monitoramento

O monitoramento de adultos de *Diatraea saccharalis* por meio de armadilhas com feromônio sexual constitui uma ferramenta amplamente utilizada em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP), pois permite detectar a presença da praga e antecipar possíveis surtos populacionais. Segundo Bento *et al.* (2016) e Parra *et al.* (2002), a captura de machos adultos está diretamente relacionada à dinâmica de revoada da praga, sendo um importante indicativo da ocorrência de acasalamento e posterior oviposição no campo.

Do ponto de vista prático, recomendações técnicas indicam que níveis de captura iguais ou superiores a seis machos por armadilha, em pelo menos 30% das armadilhas instaladas, podem ser utilizados como indicativo para adoção de medidas de controle. Esse critério, no entanto, deve ser interpretado com cautela, pois representa um sinal de risco potencial e não necessariamente um nível direto de dano econômico. Conforme destacado por Assis *et al.* (2022), a relação entre captura de

adultos e infestação larval apresenta variações significativas em função de fatores ambientais, sendo influenciada por temperatura, umidade, estágio da cultura e disponibilidade de hospedeiros.

Estudos mais recentes reforçam essa complexidade. Carbognin *et al.* (2025) demonstraram que há uma defasagem temporal entre os picos de captura de adultos e o aumento da infestação larval no campo, podendo essa diferença chegar a aproximadamente cinco semanas. Nesse contexto, a captura de adultos não representa o dano atual, mas sim um indicativo de infestação futura, o que reforça a necessidade de integração desse método com avaliações diretas no campo.

No presente estudo, a captura inicial de 6 e 12 adultos nas armadilhas indicou presença ativa da praga na área experimental, atendendo aos critérios técnicos de alerta para possível intervenção. Em avaliação posterior, a captura total de 37 adultos reforçou a ocorrência de revoada e movimentação populacional de *D. saccharalis*. Entretanto, esses valores não se refletiram em níveis elevados de infestação larval, uma vez que os índices de intensidade de infestação permaneceram abaixo do nível de dano econômico, inclusive nas parcelas testemunhas.

Esse resultado evidencia que a captura de adultos, embora eficiente para indicar a presença e a dinâmica populacional da praga, não garante, isoladamente, a ocorrência de dano econômico. Segundo Melo e Parra (1988), o desenvolvimento, sobrevivência e capacidade reprodutiva de *D. saccharalis* são altamente dependentes das condições térmicas, sendo que temperaturas elevadas podem reduzir significativamente a viabilidade das fases imaturas e a fecundidade das fêmeas. Assim, mesmo com a presença de adultos no campo, fatores abióticos podem limitar o estabelecimento da população.

Adicionalmente, Assis *et al.* (2022) destacam que a correlação entre captura de machos e intensidade de infestação pode apresentar baixa precisão quando utilizada isoladamente, sendo recomendada sua associação com métodos complementares, como amostragem de colmos, avaliação de ovos e monitoramento da intensidade de infestação. Essa abordagem integrada permite maior acurácia na tomada de decisão e reduz o risco de aplicações desnecessárias.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo reforçam que o monitoramento por armadilhas de feromônio deve ser interpretado como ferramenta de suporte à decisão, e não como critério único para aplicação de inseticidas. A utilização isolada da captura de adultos pode levar à superestimativa do risco de

infestação, especialmente em condições ambientais adversas ao desenvolvimento da praga, como observado no presente trabalho. Portanto, a decisão de controle deve considerar conjuntamente a captura de adultos, os níveis de infestação observados em campo, o histórico da área e as condições climáticas vigentes, conforme preconizado pelos princípios do Manejo Integrado de Pragas.

5.5 Incidência de Doenças Associadas

Durante o desenvolvimento da pesquisa, observou-se a incidência de podridão do colmo (*Colletotrichum falcatum* e *Fusarium moniliforme*) na área experimental (Figura 10). A infecção ocorre geralmente através dos orifícios deixados pela broca.

Figura 10. Sintomas de Podridão Vermelha associados às galerias de *D. saccharalis*



Fonte: Do autor.

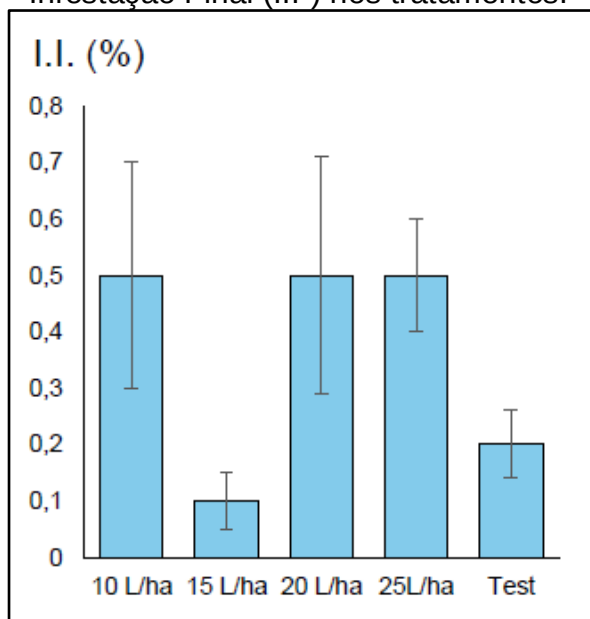
Constatou-se que grande parte dos colmos brocados apresentava sintomas típicos da doença, como descoloração avermelhada. A presença expressiva da doença pode ter interferido indiretamente na praga, pois a degradação dos tecidos reduz a atratividade do hospedeiro para alimentação das larvas.

5.6 Infestação Final e Produtividade (TCH)

A avaliação da Intensidade de Infestação Final (IIF) confirmou os níveis residuais de dano na área. O tratamento de 20 L ha⁻¹ apresentou o maior índice (0,53%), valor ainda muito abaixo do Nível de Dano Econômico (NDE) de 3% (Figura 11). Isso indica que a pressão da praga era insuficiente para causar perdas econômicas, inviabilizando a diferenciação estatística entre os tratamentos.

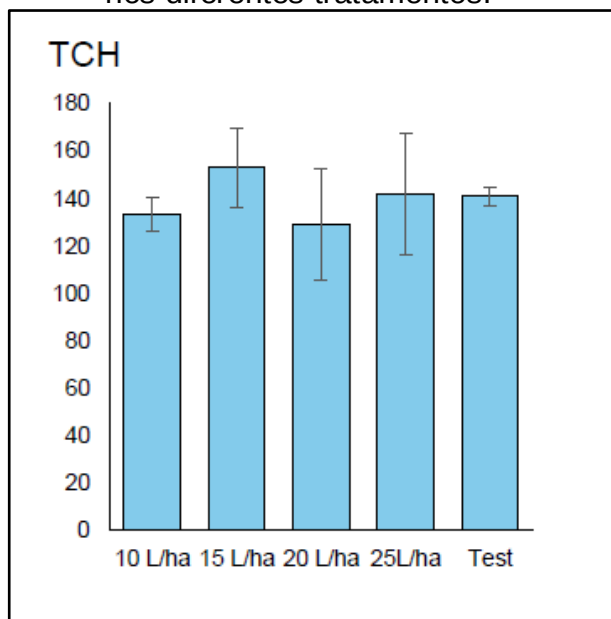
Quanto à produtividade estimada (Toneladas de Cana por Hectare - TCH), os resultados são apresentados na Figura 12.

Figura 11. Índice de Intensidade de Infestação Final (IIF) nos tratamentos.



Fonte: Do autor.

Figura 12. Produtividade da cana (TCH) nos diferentes tratamentos.



Fonte: Do autor.

O maior valor produtivo foi observado no tratamento com 15 L ha⁻¹ (153,9 t ha⁻¹), enquanto a Testemunha produziu 141,3 t ha⁻¹. A pouca variação entre os tratamentos reforça que, sob baixa incidência da broca, a performance produtiva da variedade RB86-7515 manteve-se estável, independentemente do volume de calda aplicado.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o aumento do volume de aplicação via drone influenciou significativamente alguns parâmetros físicos da pulverização em cana-de-açúcar. Houve incremento significativo no diâmetro mediano volumétrico (DMV), no volume depositado (VD), na amplitude relativa (AR) e no potencial de risco de deriva (PRD) à medida que os volumes de calda foram elevados.

Embora tenham sido observadas melhorias nos parâmetros físicos da pulverização, não foram verificadas diferenças estatísticas na eficiência biológica de controle de *Diatraea saccharalis* entre os tratamentos. Esse resultado foi atribuído à baixa pressão populacional da praga durante o período experimental, o que limitou a diferenciação da resposta biológica entre os volumes avaliados.

Dessa forma, nas condições em que o estudo foi conduzido, conclui-se que o aumento do volume de aplicação influencia principalmente a qualidade física da pulverização, promovendo maior deposição da calda, sem que fosse possível estabelecer diferenças quanto à eficiência de controle da broca-da-cana.

7. REFERÊNCIAS

ANTUNIASSI, U. R. Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas. Botucatu: FEPAF, 2015.

ANTUNIASSI, U. R.; GANDOLFO, M. A. Projeto IPP – inspeção periódica de pulverizadores. *In*: RAETANO, C. G.; ANTUNIASSI, U. R. (org.). Qualidade em tecnologia de aplicação. Botucatu: FEPAF, 2004. p. 69–84.

ANTUNIASSI, U. R.; RAETANO, C. G.; GANDOLFO, M. A. Qualidade em tecnologia de aplicação. Botucatu: FEPAF, 2019.

ARRIGONI, E. B.; MACEDO, N.; BOTELHO, P. S. M. Broca da cana-de-açúcar: o que estamos perdendo. *Visão Agrícola*, n. 1, p. 55-57, 2004.

ASSIS, H. L. B. *et al.* Estimating the relationship of sugarcane borer larvae and crop damage based on adult captures and climate variables. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 79, n. 4, e20210087, 2022.

BARBOSA, A. M. M. *et al.* Rotação de culturas com amendoim em áreas de cana-de-açúcar: impactos na fertilidade do solo. *Revista Ceres*, v. 66, n. 1, p. 9-17, 2019.

BELÉM, C. S. Q. P. Simulação da intensidade de infestação de *Diatraea saccharalis* e impactos na qualidade tecnológica e econômica da cana-de-açúcar. 2017. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, 2017.

BENTO, J. M. S.; PARRA, J. R. P.; VILLAS BÔAS, G. L. Manejo de pragas da cana-de-açúcar. *In*: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Eds.). Cana-de-açúcar. 2. ed. Campinas: IAC, 2016. p. 509-533.

CAIRES, E. F. *et al.* Long-term effects of lime and gypsum applications on soil fertility and crop yield. *Soil and Tillage Research*, v. 196, p. 104-482, 2020.

CAMILLO, M. C. Comportamento de variedades de cana-de-açúcar, em duas idades, ao ataque de *Diatraea saccharalis*. 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, 2011.

CARBOGNIN, É. R. *et al.* Population dynamics and infestation intensity of *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae) in sugarcane: adult monitoring as a decision-support tool in pest management. *Crop Protection*, [S.l.], v. 178, 105991, 2025.

CARVALHO, F.; HIRAKURI, M. Tecnologia de aplicação com drones na agricultura. Curitiba: Embrapa, 2020.

CHAIM, A. Tecnologia de aplicação de agroquímicos: princípios e práticas. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

CHAIM, A. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos: fatores que afetam a eficiência e o impacto ambiental. *In*: SILVA, C. M. M. S.; FAY, E. F. (org.). Agrotóxicos e ambiente. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 317–347.

CHECHI, A. *et al.* The combined use of spray volumes and droplet sizes in the control of Asian soybean rust. *Crop Protection*, v. 136, p. 105212, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar – Safra 2023/24. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 08 jan. 2026.

CUNHA, J. P. A. R.; LOPES, L. L.; ALVARENGA, C. B. Chemical control of coffee berry borer using unmanned aerial vehicle under different operating conditions. *AgriEngineering*, v. 6, n. 2, p. 1639-1648, 2024.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Eds.). Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agronômico, 2016.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). FAOSTAT – Crops. Rome, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 15 mar. 2025.

FIGUEIREDO, P. A. M. Manejo da cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 2015.

FRANCO, H. C. J. *et al.* Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Eds.). Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol. 2. ed. Viçosa: UFV, 2019. p. 259-292.

GALLO, D. *et al.* Entomologia agrícola. Piracicaba: FEALQ, 2002.

GASPAR, M. *et al.* Peanut cultivation in sugarcane reform areas: benefits and challenges. *Sugar Tech*, v. 23, p. 1339-1348, 2021.

GOEBEL, F.-R.; SALLAM, N. New pest threats for sugarcane in the new bioeconomy and how to manage them. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 3, n. 1-2, p. 81-89, 2011.

GÓMEZ, L. A. *et al.* Impacto da podridão vermelha sobre a produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. *Sugar Tech*, v. 19, p. 45-53, 2017.

GRIMI, M. *et al.* Sugarcane borer damage and productivity losses. *Journal of Sugarcane Research*, v. 8, n. 2, p. 45-53, 2018.

HUANG, Y.; HOFFMANN, W. C.; FRITZ, B. K.; THOMSON, S. J.; CARTER, J. D. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 25, n. 6, p. 803–809, 2009.

JORGE, L. A.; INAMASU, R. Y. Agricultura de precisão. Brasília: Embrapa, 2014.

LANDELL, M. G. A. *et al.* Estratégias de uso de mudas de cana-de-açúcar com diferentes idades. *Revista STAB*, v. 32, n. 3, p. 26-31, 2013.

LANDELL, M. G. A. *et al.* Estratégias de uso de variedades de cana-de-açúcar e sua resistência a doenças. *Revista STAB*, v. 31, n. 2, p. 24-31, 2013.

LI, J.; WANG, D.; ZHAO, C. Spray droplet distribution uniformity and its optimization for UAV spraying systems. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 202, p. 1-10, 2023.

MELO, A. B. P. de; PARRA, J. R. P. Biologia de *Diatraea saccharalis* em diferentes temperaturas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 23, n. 7, p. 663-680, jul. 1988.

MIRANDA, L. L. Podridão vermelha da cana-de-açúcar: impactos e manejo. Campinas: IAC, 2014.

OLIVEIRA, Sabrina Juvenal de. Dinâmica dos fatores naturais de mortalidade de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar adjacentes a fragmentos de florestas. 2021. 46 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia Agrícola) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/e87e3fa4-c2af-4936-b75c-53b654a423b0/download>. Acesso em: 21 out. 2025.

PARRA, J. R. P. *et al.* Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores. São Paulo: Manole, 2002.

PARRA, J. R. P.; CASTRO, M. J. P. Controle biológico aplicado na cana-de-açúcar: situação atual e perspectivas. *Biológico*, v. 79, n. 1, p. 9-14, 2017.

PERFORMANCE de cultivares de cana-de-açúcar, transgênica e convencional, em ambiente irrigado. *Revista Mirante*, v. 16, 2023. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/mirante/article/view/14569/10042>. Acesso em: 21 out. 2025.

PINTO, A. S. *et al.* Nível de dano econômico de *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae) na cultura da cana-de-açúcar. *BioAssay*, v. 1, n. 6, p. 1-6, 2006.

POPULATION dynamics of sugarcane borers (*Diatraea* spp.) under different climatic scenarios in Colombia. *PLOS One*, 2021. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0244694>. Acesso em: 21 out. 2025.

PRADO, E. P. *et al.* Taxa de aplicação e uso de surfactante siliconado na deposição da pulverização e controle da ferrugem da soja. *Engenharia Agrícola*, v. 35, n. 3, p. 514-527, 2015.

QIN, W. *et al.* Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers. *Crop Protection*, v. 85, p. 79-88, 2016.

RAIJ, B. van *et al.* Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: IAC, 1997.

ROSSETTO, R. *et al.* Manejo nutricional da cana-de-açúcar para a produção de energia. *Informações Agrônomicas*, n. 131, p. 1-15, 2010.

SANTOS, F. *et al.* Doenças da cana-de-açúcar e seu manejo integrado. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 49, n. 3, p. 1-11, 2019.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol. 2. ed. Viçosa: UFV, 2015.

SATHYABHAMA, M. *et al.* Identification of differentially expressed genes in sugarcane during pathogenesis of *Colletotrichum falcatum* by suppression subtractive hybridization (SSH). Sugar Tech, v. 18, p. 176-183, 2016.

SHAN, C. *et al.* Effects of droplet size and spray volume parameters on droplet deposition of wheat herbicide application using UAV. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, v. 14, n. 1, p. 74-81, 2021.

SILVA, M. F. Monitoramento e manejo de *Diatraea saccharalis* em cana-de-açúcar. São Paulo: UNESP, 2021.

SILVA, M. F.; FUNICHELLO, M.; SOUZA, D. M. Performance of insecticides in control of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) in sugarcane. Arquivos do Instituto Biológico, v. 87, p. e0782018, 2020.

SOUZA, J. R. Resistência intrínseca de cultivares de cana-de-açúcar a *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) e extrínseca ao parasitoide *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891) (Hymenoptera: Braconidae). 2011. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, 2011.

VARGAS, G.; GÓMEZ, L. A.; JOHN, P. M. Sugarcane stem borers of the Colombian Cauca River Valley: current pest status, biology, and control. Florida Entomologist, v. 98, n. 2, p. 728-735, 2015.

WANG, G. *et al.* Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat. Pest Management Science, v. 75, n. 6, p. 1546-1555, 2019.

WANG, J.; ZHANG, L.; SHI, Y. Effect of rotor airflow of unmanned aerial vehicle on droplet deposition distribution. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, v. 12, n. 6, p. 23-28, 2019.

ZHANG, S.; HE, X.; LI, L. Effects of flight parameters and droplet size on pesticide deposition in rice canopy using UAV sprayer. Agronomy, v. 10, n. 4, p. 486, 2020.

ZHANG, X. Q. *et al.* Effects of spray parameters of drone on the droplet deposition in sugarcane canopy. Sugar Tech, v. 22, p. 583-588, 2020.

ZHANG, Y.; CHEN, M.; LIU, F. Optimization of droplet deposition for UAV-based pesticide application in maize. Pesticide Biochemistry and Physiology, v. 179, p. 105991, 2022.