

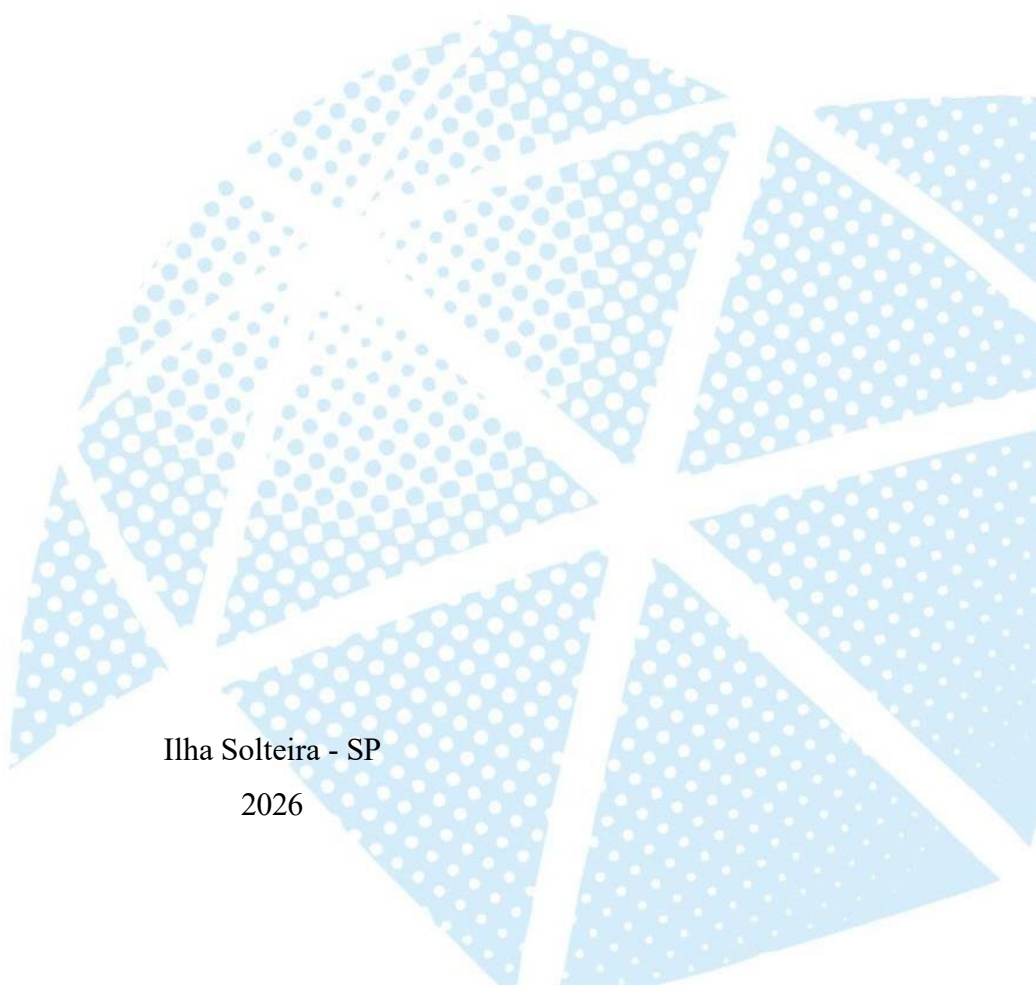
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GABRIEL RETUCI DAL’RI

**INFLUÊNCIA DE PONTAS HIDRÁULICAS DE PULVERIZAÇÃO E UMIDADE
RELATIVA DO AR NA DEPOSIÇÃO EM PAPEL HIDROSSENSÍVEL EM
AMBIENTE CONTROLADO**

Ilha Solteira - SP

2026



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

GABRIEL RETUCI DAL'RI

**INFLUÊNCIA DE PONTAS HIDRÁULICAS DE PULVERIZAÇÃO E UMIDADE
RELATIVA DO AR NA DEPOSIÇÃO EM PAPEL HIDROSSENSÍVEL EM
AMBIENTE CONTROLADO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de Concentração: Sistemas de produção.

Prof. Dr. Evandro Pereira Prado
Orientador

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

- D151i Dal’Ri, Gabriel Retuci.
Influência de pontas hidráulicas de pulverização e umidade relativa do ar na deposição em papel hidrossensível em ambiente controlado / Gabriel Retuci
Dal’Ri. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
49 f. : il.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2026
- Orientador: Evandro Pereira Prado
- Inclui bibliografia
1. Pulverização agrícola. 2. Pontas hidráulicas. 3. Uniformidade de distribuição volumétrica. 4. Diâmetro volumétrico da gota.

Sandra Montibeller- CRB-8/060/2025

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Reside na capacidade de transformar dados científicos em diretrizes práticas para o campo, permitindo que produtores e agrônomos tomem decisões assertivas para otimizar a tecnologia de aplicação. Ao mapear como a escolha da ponta de pulverização e a altura da barra mitigam os efeitos nocivos da baixa umidade relativa do ar, o estudo viabiliza a ampliação segura da janela de aplicação em condições críticas, reduzindo drasticamente o desperdício de insumos por evaporação e os riscos ambientais de deriva. Consequentemente, a pesquisa gera um impacto triplo: econômico, ao garantir a eficiência biológica dos defensivos e proteger o teto produtivo da lavoura; ambiental, ao blindar ecossistemas vizinhos contra contaminações; e técnico, ao quebrar o paradigma de que gotas ultragrossas resultam em má distribuição, provando que a regulação correta da altura da barra compensa a cobertura e assegura a uniformidade da aplicação.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

It lies in the ability to transform scientific data into practical guidelines for the field, allowing producers and agronomists to make assertive decisions to optimize application technology. By mapping how the choice of spray nozzle and boom height mitigate the harmful effects of low relative humidity, the study enables the safe expansion of the application window in critical conditions, drastically reducing the waste of inputs due to evaporation and the environmental risks of drift. Consequently, the research generates a triple impact: economic, by ensuring the biological efficiency of pesticides and protecting the productive potential of the crop; environmental, by shielding neighboring ecosystems from contamination; and technical, by breaking the paradigm that ultra-coarse droplets result in poor distribution, proving that the correct adjustment of the boom height compensates for coverage and ensures application uniformity.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Influência de pontas hidráulicas de pulverização e umidade relativa do ar na deposição em papel hidrossensível em ambiente controlado.

AUTOR: GABRIEL RETUCI DAL'RI

ORIENTADOR: EVANDRO PEREIRA PRADO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia, área:
Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. EVANDRO PEREIRA PRADO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **EVANDRO PEREIRA PRADO**
Data: 15/05/2026 16:47:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LEANDRO TROPALDI (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **LEANDRO TROPALDI**
Data: 15/05/2026 16:55:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador RODOLFO GLAUBER CHECHETTO (Participação Virtual)
AgroEfetiva Serviços Ltda.

Documento assinado digitalmente
 **RODOLFO GLAUBER CHECHETTO**
Data: 19/05/2026 10:04:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ilha Solteira, 15 de maio de 2026.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, cuja graça tornou esta jornada possível, guiando meus passos no momento em que decidi caminhar.

Aos meus pais, à minha irmã e à minha esposa, pelo amor incondicional, pela paciência diante das minhas limitações e manias, e pelo apoio incansável nos momentos de fragilidade e desafios. Vocês foram o meu porto seguro.

À Universidade Estadual Paulista (Unesp) e, de modo especial, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), bem como a todos que fizeram parte desta caminhada. Este trabalho é o reflexo da máxima que aqui aprendi: sozinhos podemos ir mais rápido, mas juntos vamos mais longe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus pais, Marlei e Cezar, pelo constante incentivo e auxílio ao longo deste mestrado. O suporte de vocês foi fundamental em todas as etapas, especialmente na execução prática do meu experimento. À minha irmã, Maitany, agradeço pela presença e parceria em toda a fase experimental; e à minha esposa, Anna Beatriz, sou grato por cada conselho, paciência e apoio incondicional.

Ao meu orientador, Professor Dr. Evandro Pereira Prado, estendo meus sinceros agradecimentos pela paciência na condução deste processo, por sanar minhas dúvidas recorrentes e pelos valiosos ensinamentos que levarei para a vida profissional.

Aos técnicos de campo da FCAT, meu muito obrigado pelo suporte essencial na condução da pesquisa. Agradeço também aos funcionários e professores da FCAT e da FEIS; o empenho na manutenção dos espaços e a excelência no ensino permitiram um crescimento pessoal e profissional que superou todas as minhas expectativas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A variabilidade meteorológica e as diferenças geométricas entre os bicos de pulverização afetam diretamente a deposição, a densidade, a cobertura da superfície e o risco de deriva das gotas. Este estudo avaliou oito pontas de pulverização hidráulicas em condições controladas para determinar a interação entre a altura da barra de pulverização e a umidade relativa do ar com o design da ponta, de forma a influenciar as variáveis das gotas e a qualidade da aplicação. Metodologia: Um delineamento fatorial $2 \times 8 \times 2$ completamente aleatorizado foi conduzido em uma câmara controlada, com duas alturas de pulverização (0,50 e 0,90 m), oito bicos e dois níveis de umidade relativa ($\leq 30\%$ e 70-74%). As aplicações foram realizadas a 120 L/ha^{-1} , 207 kPa e 5 km/ha^{-1} . Papéis sensíveis à água foram digitalizados a 600 dpi e analisados usando o software Gotas® para determinar a cobertura e a densidade das gotas. Os parâmetros do espectro de gotas de diâmetros volumétricos (DV10, DV50, DV90) foram medidos com o sistema VisiSize P15. A amplitude relativa e o coeficiente de variação (CV%) foram calculados a partir da deposição nos canais de fluxo de coleta. Os dados foram analisados usando ANOVA e o teste de média de Scott-Knot nos níveis de significância de 5% e 1%. Resultados: As pontas de pulverização afetaram significativamente o DV50 e a amplitude relativa. As Pontas ultragrossas produziram os maiores valores de DMV. Nenhuma relação linear consistente foi observada entre DMV e amplitude relativa. Uma interação significativa entre ponta e altura influenciou a uniformidade de distribuição volumétrica das pontas. As pontas de gotas ultragrossas apresentaram valores de CV mais baixos, especialmente a 0,90 m, provavelmente devido à maior sobreposição do jato. A baixa umidade relativa aumentou o risco de deriva e reduziu o desempenho de deposição. A densidade e a cobertura das gotas diminuíram à medida que o DMV aumentou, com a altura do jato exercendo efeitos mais fortes sobre a cobertura. Conclusões: As Pontas de gotas finas maximizaram a cobertura e a densidade de gotas em umidade alta e menor altura de deposição ao alvo, enquanto as pontas ultragrossas tiveram maior deposição em cobertura e densidade de gota/cm² em umidade baixa e em condições propensas à deriva.

Palavras-chaves: pulverização agrícola; pontas hidráulicas; uniformidade de distribuição volumétrica; diâmetro volumétrico de gota.

ABSTRACT

Meteorological variability and geometric differences between spray nozzles directly affect droplet deposition, density, surface coverage, and drift risk. This study evaluated eight hydraulic spray nozzles under controlled conditions to determine the interaction between spray boom height and relative air humidity with nozzle design, in order to influence droplet variables and application quality. Methodology: A completely randomized $2 \times 8 \times 2$ factorial design was conducted in a controlled chamber, with two spray heights (0.50 and 0.90 m), eight nozzles, and two relative humidity levels ($\leq 30\%$ and 70-74%). Applications were carried out at 120 L/ha⁻¹, 207 kPa, and 5 km/ha⁻¹. Water-sensitive papers were scanned at 600 dpi and analyzed using Gotas® software to determine droplet coverage and density. The parameters of the droplet spectrum of volumetric diameters (DV10, DV50, DV90) were measured using the VisiSize P15 system. Relative amplitude and coefficient of variation (CV%) were calculated from the deposition in the collection flow channels. Data were analyzed using ANOVA and the Scott-Knott mean test at significance levels of 5% and 1%. Results: Spray nozzles significantly affected DMV and relative amplitude. Ultra-coarse nozzles produced the highest DMV values. No consistent linear relationship was observed between DMV and relative amplitude. A significant interaction between nozzle and height influenced the volumetric distribution uniformity of the nozzles. Ultra-coarse droplet nozzles showed lower CV values, especially at 0.90 m, probably due to greater jet overlap. Low relative humidity increased the risk of drift and reduced deposition performance. Droplet density and coverage decreased as the volumetric diameter (VD) increased, with spray height exerting stronger effects on coverage. Conclusions: Fine droplet nozzles maximized coverage and droplet density at high humidity and lower deposition height to the target, while ultra-coarse nozzles had greater deposition coverage and droplet density/cm² at low humidity and under drift-prone conditions.

Keywords: agricultural spraying; hydraulic nozzles; volumetric distribution uniformity; droplet volumetric diameter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama da simulação da aplicação dos tratamentos (ponta de pulverização e alturas de aplicação) em diferentes umidades relativas do ar.....	27
Figura 2 – Pulverização nos cartões (A), distribuição dos cartões para as pontas no simulador de aplicação a 50 cm e 90 cm (B), Suporte utilizado (C), Disposição das repetições na mesa (D), Digitalização no Scanner das repetições (E) e Leitura no programa Gotas.....	28
Figura 3 – Leitura do diâmetro volumétrico das gotas (A) e pulverização nas canaletas para perfil de distribuição volumétrica (B) (Silva 2025).....	29
Figura 4 – perfil de distribuição volumétrica de pontas de pulverização operando nas alturas de 0,5 e 0,9 m.....	34
Figura 5 – Correlação entre Densidade de Gotas (Figura 5A) Cobertura (Figura 5B) entre DMV.....	41
Figura 6- Imagens dos papais hidrossensíveis alturas de 0,5 m e 0,9 m. A esquerda está representando a umidade baixa e a direitiro umidade alta.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontas de pulverização estudadas e suas características.....	25
Tabela 2 – Médias das condições meteorológicas no momento das pulverizações dos experimentos de deposição.....	26
Tabela 3 – Quadrado médio da ANOVA (estatística <i>F</i>) e normalidade dos resíduos (probabilidade do teste de Shapiro-Wilk) para as variáveis DV0,5 e amplitude relativa (AR) do leitor VisiSize P15 em função das pontas de pulverização.....	31
Tabela 4 – Comparação do teste de média para DV0,5 e para a amplitude relativa (AR).....	31
Tabela 5 – Quadrado médio da ANOVA (estatística <i>F</i>) e normalidade dos resíduos (probabilidade do teste de Shapiro-Wilk) para a variável coeficiente de variação (CV%) da uniformidade de distribuição em função da altura e da ponta de pulverização.....	32
Tabela 6 – Estatística coeficiente de uniformidade de variação.....	33
Tabela 7 – Quadrado médio da ANOVA (estatística <i>F</i>) e normalidade dos resíduos (probabilidade do teste de Shapiro-Wilk) para as variáveis % de cobertura do PSA e densidade de gotas em função da altura de aplicação, da ponta de pulverização e da umidade do ar.....	37
Tabela 8 – Densidade de gotas no papel hidrossensível e desvio padrão ($\pm dp$) com aplicação foliar de água para diferentes tipos de pontas de pulverização, em diferentes umidades relativas do ar.....	38
Tabela 9 – Porcentagem de cobertura em papel hidrossensível e desvio padrão com aplicação foliar de água para diferentes pontas de pulverização em duas umidades relativas do ar ($\leq 30\%$ e $\geq 70\%$).....	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.1.2	Objetivos específicos:.....	14
3	HIPÓTESE.....	15
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
4.1	FUNDAMENTOS DA PULVERIZAÇÃO HIDRÁULICA E PONTAS DE PULVERIZAÇÃO.....	16
4.2	PARÂMETROS DE LEITURAS DE PONTAS.....	18
4.3	PAPEIS HIDROSSENSÍVEIS.....	19
4.4	ALTURA DE DEPOSIÇÃO AO ALVO.....	21
4.5	INTERFERÊNCIA DO AMBIENTE NA APLICAÇÃO	21
4.6	O PROCESSO DE EVAPORAÇÃO E A REDUÇÃO DINÂMICA DE DIÂMETRO.....	23
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
5.1	LOCAL E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	25
5.2	Identificação das amostras e coletas para análises dos fatores.....	26
5.2.1	Coleta das amostras.....	26
5.2.2	Determinação dos diâmetros volumétricos das gotas.....	28
5.2.3	Análise de distribuição volumétrica e espectro de gotas.....	29
5.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	30
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
6.1	Espectro de gotas e distribuição volumétricas das pontas de pulverização.....	31
6.2	Deposição no cartão hidrossensível cobertura e densidade de gotas/cm²	37
7	CONCLUSÕES.....	43
	REFERÊNCIAS:.....	44

1 INTRODUÇÃO

O uso de equipamentos mecânicos de pulverização para aplicação de produtos fitossanitários e nutrientes revolucionou a agricultura, pois contempla a eficiência de deposição do produto sobre o alvo com baixo custo operacional (Baumhardt et al., 2017; Azeez, 2021; Zhang et al., 2021; Zampiroli et al., 2022). Nesse contexto, entender o papel das pontas de pulverização é o primeiro passo para o sucesso da operação; O princípio de funcionamento das pontas são: forçar o líquido sob pressão em sentido a orifícios de diferentes geometrias, o que promoverá o tamanho e a uniformidade das gotas, a cobertura do alvo e a densidade de gotas por área. E cada ponta tem seu atributo de pressão de trabalho, velocidade e a altura de trabalho, determinando diretamente a uniformidade de deposição da calda (Wolf & Daggupati, 2005; Guler et al., 2012).

Diante dessa importância, novos modelos de pontas de pulverização são lançados regularmente no mercado pelas indústrias, prometendo maior eficiência e controle de deriva. No entanto, as informações sobre o uso prático dessas novas tecnologias muitas vezes são pouco exploradas, gerando um severo desafio de escolha para os produtores. A grande problemática reside no fato de que os dados técnicos nominais fornecidos pelos catálogos de fabricantes são obtidos em condições laboratoriais perfeitamente padronizadas. (Wolf & Daggupati, 2005).

No ecossistema real do campo, esses dados sofrem distorções causadas pelos impactos ambientais e operacionais imediatos, tornando as recomendações teóricas frequentemente imprevisíveis face às oscilações das culturas. Essa falta de previsibilidade afeta diretamente a recomendação das tecnologias mais consolidadas na rotina do campo. Em geral, os modelos de pontas pioneiros e que detêm maior expressividade na agricultura são as pontas de jato cônico e as de jato plano. As de jato cônico geram um fluxo tangencial que favorece a rotação do líquido, atingindo eficientemente as folhas da parte inferior do dossel de culturas densas, como a soja, no controle da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*), que exige cobertura completa (Wolf & Daggupati, 2005).

Por outro lado, as pontas de jato plano formam um "leque" de aplicação, tornando-as mais adequadas para atingir o terço inferior das plantas em aplicações preventivas, antes do fechamento total desse dossel. Contudo, o conflito operacional se agrava quando confrontamos esses designs de pontas com a realidade climática e a dinâmica do manejo.

A campo, o produtor frequentemente se depara com um dilema técnico: as pontas que oferecem os melhores índices de cobertura (gotas finas provenientes de jatos cônicos ou planos padrão) são exatamente as mais vulneráveis à degradação ambiental. As condições

meteorológicas no momento das pulverizações sobretudo a baixa umidade relativa do ar e a alta temperatura influenciam os resultados. Esse estresse climático acelera o tempo de evaporação das gotas, reduzindo a eficiência de deposição e dificultando a absorção foliar dos ingredientes ativos (Lasmar & Cunha, 2006; Yu et al., 2009; Laguerre et al., 2017).

Para dimensionar esse impacto, gotas de aproximadamente 200 μm permanecem até 175 segundos a mais no ar sob clima ameno (20 °C e 80% de UR) em comparação com um cenário crítico de 30 °C e 50% de UR (Matheus, 1999). Além da perda de água por evaporação, os próprios ingredientes ativos podem sofrer com a volatilização e degradação térmica, alterando suas propriedades físico-químicas e comprometendo o controle (Lasmar & Cunha, 2016; Sijs & Bonn, 2020; Wang et al., 2022).

O problema se torna ainda mais complexo quando somamos a essa equação a variabilidade da altura de deposição (altura da barra de pulverização em relação ao alvo). Na rotina das propriedades agrícolas, os operadores raramente conseguem manter a barra na altura padrão recomendada de 0,5 m. Devido às irregularidades topográficas do terreno, à alta velocidade operacional exigida para o cumprimento de metas e ao receio de choques mecânicos da estrutura com o solo ou com a cultura, é comum observar barras trabalhando a marcas críticas de até 0,90 m de altura. Essa variação altera drasticamente o "tempo de voo" das gotas na atmosfera. Cientificamente, o aumento da altura atua como um catalisador de perdas: uma barra posicionada a 0,90 m sob uma umidade relativa crítica de 30% expõe as gotas finas a um ambiente severamente desidratante por um período prolongado, fazendo com que uma fração massiva da calda evapore ou sofra deriva antes mesmo de atingir a folha. (Aard, 2015; Maciel et al., 2018).

Por essa razão, torna-se vital para o produtor quantificar detalhadamente a interação exata entre o modelo da ponta, a altura de deposição e as influências climáticas na lavoura. O principal gargalo enfrentado no campo é o efeito combinado da alta temperatura com a baixa umidade relativa do ar, sendo comum a necessidade de estender as aplicações para horários críticos onde a UR despenca para a casa dos 30% bem abaixo dos 50% recomendados pelas boas práticas agrícolas (Alvarenga et al., 2014; Souza; Cunha; Alves, 2017). Até o momento, a falta de dados integrados que cruzem simultaneamente esses três fatores (tipo de ponta; umidade extrema de 30% versus 70% e altura de barra de 0,50 m versus. 0,90 m) faz com que o produtor tome decisões baseadas no empirismo, resultando em desperdício de insumos, falhas no controle de pragas, aumento da pressão de resistência biológica e severos prejuízos econômicos e ambientais (Aard, 2015; Maciel et al., 2018).

Parâmetros como o tamanho, a densidade de gotas e a porcentagem de cobertura

desempenham papel significativo na eficácia dos produtos fitossanitários, mas variáveis edafoclimáticas imprevisíveis em campo (notadamente as rajadas de vento) frequentemente mascaram o real desempenho isolado dessas tecnologias (Oliveira et al., 2021; Prado et al., 2024). Justifica-se, portanto, a realização de testes em ambiente controlado. Isolar essas variáveis externas permite analisar de forma pura as características intrínsecas de oito modelos distintos de pontas sob umidades específicas (70% e 30% de UR) e alturas de deposição predeterminadas (0,5 m e 0,9 m). Este estudo em ambiente fechado é essencial para gerar dados limpos e confiáveis, entregando respostas exatas aos produtores sobre as configurações ideais de operação. (Guler et al., 2012; He et al., 2025).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de pontas hidráulicas de pulverização, quanto à porcentagem de cobertura e à densidade das gotas em papéis hidrossensíveis em distintas condições meteorológicas. Além disso, analisou-se o espectro de gotas e a uniformidade de distribuição.

2.1.2 Objetivos específicos:

- 1 - Verificar a influência da umidade relativa do ar sobre a cobertura e densidade de gotas de diferentes pontas de pulverização.
 - 1- Verificar a influência da umidade relativa do ar sobre a cobertura e densidade de gotas de diferentes pontas de pulverização.
 - 2- Recomendar as pontas de pulverização mais adequadas em relação às condições meteorológicas no momento da aplicação.
 - 3- Identificar a *performance* entre espectro de gotas; amplitude relativa; uniformidade de distribuição e suas interações na cobertura e densidade de gotas.

3 HIPÓTESE

H0- Pontas de gotas finas apresentarão maior densidade de gotas/cm² em umidade relativa alta. O aumento da altura da barra reduzirá a eficiência de deposição das gotas finas.

H1- Será possível correlacionar a quantidade de densidade de gotas e cobertura de acordo com o espectro de gotas das pontas. Existe relação inversa entre DMV e densidade de gotas depositadas.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 FUNDAMENTOS DAS PONTAS DE PULVERIZAÇÃO

A pulverização hidráulica fundamenta-se na pressurização e fragmentação de um fluido transformado em gotas por meio da passagem de um orifício. Segundo Matthews et al. (2014), a ponta de pulverização é o componente técnico de maior relevância no sistema, pois define não apenas o volume de calda aplicado, mas a qualidade da distribuição e o espectro de gotas (Alvarenga et al. 2021).

No cenário produtivo atual, as pontas de jato plano (leque) e jato cônico vazio permanecem como as mais utilizadas devido à sua versatilidade. As pontas de jato plano são amplamente empregadas em aplicações de herbicidas e tratamentos em estágios iniciais, pois proporcionam uma distribuição linear uniforme ao longo da barra (Ferreira et al., 2020). Já as pontas de jato cônico, são reconhecidas pela produção de gotas finas e variabilidade na uniformidade de distribuição, são as preferidas para aplicações de fungicidas em dosséis densos (Cunha et al., 2019). A recomendação técnica deve, contudo, basear-se na necessidade específica: para o controle de patógenos no baixeiro da soja, recomenda-se pontas de jato duplo leque ou cone vazio, que favorecem a penetração foliar; para aplicações de herbicidas pré-emergentes ou sistêmicos em condições de vento limítrofe (acima de 8-10 km/h), a recomendação recai obrigatoriamente sobre pontas com indução de ar para garantir a segurança ambiental e a permanência do produto na área alvo.

Como primeira linha de resposta a esse desafio de fracionamento das gotas finas, surgem as pontas BD (Baixa Deriva) e AD (Antideriva), as quais operam sob o princípio de redução da energia cinética do fluido por meio de restrições geométricas internas, sem a necessidade de introdução de ar no sistema. Para alcançar esse objetivo, Ramos et al. (2015) esclarecem que essas pontas possuem um pré-orifício posicionado imediatamente antes do orifício elíptico de saída. Esse arranjo mecânico causa uma perda de carga (queda de pressão interna), fazendo com que o líquido chegue à fenda externa com menor velocidade. O resultado prático é o espessamento da lâmina líquida, que reduz substancialmente o volume de gotas satélites muito finas (100 μm), tornando-as adequadas para a aplicação de produtos sistêmicos (herbicidas e inseticidas) em condições de umidade baixa.

A fim de contornar as limitações de pressão observadas nas pontas de restrição física pura,

uma segunda categoria tecnológica foi desenvolvida: as pontas ADIA (Antideriva com Indução de Ar) e MUG (Magno Ultra Grossa), que avançam na engenharia de mitigação de exoderiva através do fenômeno físico do efeito Venturi.

Para que esse fenômeno ocorra, essas pontas dispõem de orifícios laterais projetados para aspirar o ar atmosférico e misturá-lo à calda pressurizada no interior de uma câmara de atomização. Segundo Gandolfo et al. (2013), o fluido ejeta gotas de diâmetro medianamente volumétrico (DMV) elevado (classificadas como grossas a ultra grossas). Estas gotas contêm bolhas de ar encapsuladas que, ao se chocarem contra a superfície foliar, fragmentam-se ("explodem"), minimizando o efeito rebote (escorrimento) e garantindo a cobertura foliar de herbicidas sistêmicos e dessecantes, mesmo em janelas meteorológicas curtas.

Dentro dessa mesma lógica operativa, a ponta ADGA diferencia-se pelo desenho que expande o ângulo do leque (geralmente para 120° a 130°), permitindo trabalhar com a barra de pulverização mais próxima ao alvo, o que diminui o tempo de exposição da gota ao vento. Já a ponta MUG possui um desalinhamento intencional de saída (inclinada em 30°), projetada especificamente para direcionar o jato contra a resistência aerodinâmica gerada pelo deslocamento do trator.

Contudo, essa magnitude no tamanho das gotas gera controvérsias na literatura, pois Alvarenga (2018) argumenta que o diâmetro extremo das partículas geradas pela ponta MUG (muitas vezes ultrapassando $600\ \mu\text{m}$) compromete severamente a penetração em culturas com arquitetura foliar densa (como soja em estágio de fechamento de ruas). Devido ao grande volume individual, as gotas ficam retidas estritamente na parte superior, deixando o baixeiro desprotegido.

Distanciando-se do padrão de jato em leque das tecnologias anteriores, as pontas CH (Cone Cheio) e MUGCV (Magno Ultra Grossa Cone Vazio) introduzem uma dinâmica geométrica distinta, baseando-se na indução de forças centrífugas através de espirais internas (difusores ou carretéis) para fracionar o líquido.

No caso específico da ponta CH (Cone Cheio), a distribuição das gotas ocorre preenchendo toda a geometria circular do impacto. Por essa razão, ela é recomendada por Baio et al. (2019) para aplicações direcionadas de inseticidas e fungicidas onde se deseja alta turbulência para romper a camada limite do ar ao redor das folhas. Por outro lado, a ponta MUGCV (Cone Vazio com Indução de Ar) funde o padrão geométrico de anel circular vazio com a injeção de ar descrita no tópico anterior, visando especificamente à aplicação de herbicidas em áreas propensas à deriva (Oliveira et al., 2020).

Todavia, essa alteração na geometria do jato é alvo de duras críticas acadêmicas, visto que Cunha e Silva (2022) asseveram que o uso de pontas de padrão cônico (CH e MUGCV) em barras de pulverização horizontais é conceitualmente inconsistente. O perfil de distribuição dessas pontas não possui o decaimento linear nas bordas característico das pontas de jato plano (BD, ST). Ao se sobrepor na barra, ocorrem zonas de superdosagem localizada.

Como alternativa para os problemas de sobreposição e altura de barra que afetam os modelos cônicos e de leque padrão, a engenharia agrícola consolidou a ponta ST (Série Turbo), caracterizada como uma ponta de jato plano de grande ângulo que utiliza o princípio da deflexão física.

Para atingir essa amplitude, a ponta ST faz com que o jato de fluido colida contra uma rampa ou anteparo defletor angulado (geralmente a 135°). Ramos et al. (2015) relatam que essa geometria distribui o líquido em um leque extremamente amplo e com maior uniformidade transversal. Ela foi desenvolvida para permitir duas táticas operacionais: o aumento do espaçamento entre bicos na barra (reduzindo custos) ou o rebaixamento da altura da barra de pulverização em relação ao solo para diminuir a ação do vento sobre as gotas em movimento.

Associado a esse desgaste físico, o ângulo estendido (135°) torna o sistema altamente sensível à oscilação vertical da barra. Qualquer variação na altura do pulverizador provocada pelas irregularidades do terreno altera drasticamente a largura da faixa depositada. Conforme mapeado por Baio et al. (2019), pequenas oscilações para baixo geram zonas de subdosagem crítica entre as pontas, comprometendo a eficácia de herbicidas pré-emergentes que demandam uma película contínua e homogênea sobre o solo.

4.2 PARÂMETROS DE LEITURA DAS PONTAS

O espectro de gotas produzido por uma ponta de pulverização é inerentemente heterogêneo, sendo sua caracterização fundamental para prever o destino da calda no ambiente. A principal métrica utilizada é o Diâmetro Mediano Volumétrico (DMV), que indica o tamanho de gota que divide o volume da calda aplicada em duas partes iguais. Segundo Alvarenga et al. (2021). Um exemplo de sucesso na gestão do espectro é a utilização de sensores *laser diffraction* em laboratório para certificar que pontas de indução de ar mantenham o DMV na classe de "grossa" a "muito grossa" mesmo sob variações de pressão, garantindo que o produto atinja o alvo em condições de umidade relativa crítica (Minozzo et al., 2022).

A uniformidade de distribuição quantifica a regularidade com que a calda é depositada ao

longo da barra de pulverização, sendo expressa estatisticamente pelo Coeficiente de Variação (CV). De acordo com Ferreira et al. (2020), um sistema de aplicação é considerado eficiente quando apresenta um CV inferior a 15%, garantindo que todas as plantas na faixa de aplicação recebam a dosagem correta do ingrediente ativo. Valores elevados de CV indicam a presença de faixas com subdose, que favorecem a resistência de plantas daninhas e pragas, ou sobredose, que pode causar fitotoxicidade e desperdício financeiro. O sucesso na obtenção de baixos índices de CV está diretamente relacionado à calibração rigorosa da altura da barra e ao estado de conservação das pontas; o uso de mesas de distribuição (canaletas) para aferição periódica é o método padrão que permite identificar falhas operacionais antes que elas se traduzam em prejuízos produtivos no campo.

A eficácia de um defensivo agrícola está estritamente vinculada à capacidade da ponta em gerar uma densidade mínima de gotas por área e uma porcentagem de cobertura foliar satisfatória. Conforme Ozeki e Cunha (2021), a exigência mínima varia conforme o modo de ação do produto. A cobertura, definida pela fração da superfície do alvo que foi efetivamente molhada, é o parâmetro que valida a penetração da calda. Um caso clássico de sucesso é o uso de papéis hidrossensíveis posicionados no terço inferior da cultura da soja para validar se a configuração de pontas de jato duplo leque está atingindo a densidade necessária no baixeiro; essa verificação empírica permite ajustes em tempo real na pressão ou no volume de calda (L/h^{-1}) para assegurar a proteção integral da planta (Cunha et al., 2019).

4.3 PAPÉIS HIDROSSENSÍVEIS E SISTEMA DE LASER PARA ESPECTRO DE GOTAS

O uso de papéis ou cartões hidrossensíveis consolidou-se como o método mais acessível e prático para a quantificação direta da porcentagem de cobertura e da densidade de gotas (gotas/cm²) em condições de campo. Estes cartões são constituídos por um papel de base amarela revestido com uma camada de corante especial que, ao entrar em contato com a água ou soluções aquosas, reage instantaneamente mudando para uma coloração azul intensa no ponto de impacto. De acordo com Alvarenga et al. (2021), a principal virtude técnica desta ferramenta é permitir a visualização espacial da deposição em diferentes estratos da cultura, possibilitando que o aplicador posicione os alvos artificiais no terço superior, médio e inferior (baixeiro) das plantas. Esta prática é fundamental para validar se a configuração de pontas e o volume de calda adotados são capazes de vencer as barreiras físicas do dossel. Conforme ressaltado por Ozeki e Cunha (2021), a digitalização desses cartões através de softwares de

análise de imagem ou aplicativos de smartphone permite uma interpretação estatística precisa, transformando manchas visuais em dados brutos que orientam ajustes na pressão, velocidade e escolha da ponta de pulverização.

A utilização dos papéis hidrossensíveis oferece benefícios inequívocos, como a retroalimentação imediata sobre a qualidade da aplicação e o baixo custo relativo em comparação com métodos de rastreadores fluorescentes ou químicos. Eles funcionam como uma "sentinela" da deriva e da penetração, expondo falhas que seriam invisíveis a olho nu. Entretanto, a literatura técnica aponta limitações intrínsecas que devem ser consideradas para evitar interpretações errôneas. Segundo Ferreira et al. (2020), o principal malefício ou limitação reside na sensibilidade extrema à umidade relativa do ar; em condições de alta umidade ($> 80\%$), os cartões podem sofrer saturação cromática ou manchar antes mesmo da aplicação, dificultando a leitura. Além disso, os cartões tendem a subestimar a presença de gotas extremamente finas ($< 50 \mu\text{m}$), que podem não ter energia cinética suficiente para depositar no papel, e apresentam o risco de sobreposição de gotas (coalescência) em volumes de calda elevados, o que mascara a contagem real da densidade. Outro ponto crítico mencionado por Zampirolo et al. (2022) é que o papel hidrossensível é uma superfície plana e rígida, que não mimetiza perfeitamente a complexidade morfológica, a pilosidade e a camada de cera das folhas reais, podendo apresentar taxas de retenção e rebote distintas da cutícula vegetal.

4.4 Altura de deposição ao alvo.

Segundo a literatura técnica, a altura de 0,5 m é consagrada como o padrão de excelência para pontas de jato plano com ângulo de 110° , pois nesta configuração o trespassse dos jatos ocorre de forma geométrica precisa, resultando em um Coeficiente de Variação (CV) minimizado e garantindo que a densidade de gotas e a cobertura foliar sejam homogêneas ao longo de toda a extensão da barra (Ferreira et al., 2020). O principal benefício desta altura reside na proteção da integridade do espectro de gotas: ao percorrer uma distância menor, as gotas ficam menos expostas às variáveis microclimáticas, como o Déficit de Pressão de Vapor (DPV) e correntes de ar, o que mitiga a evaporação prematura e à deriva. Conforme apontado por Maciel et al. (2018), a manutenção da barra a 0,50 m maximiza a energia cinética das gotas, favorecendo a deposição efetiva mesmo de partículas mais finas, o que representa uma oportunidade crucial para aplicações de fungicidas e inseticidas que exigem alta densidade de gotas para o controle de alvos móveis ou patógenos de difícil contato.

Por outro lado, a operação com a barra elevada a 0,9 m introduz malefícios severos que comprometem diretamente os índices de qualidade da pulverização, transformando o que seria

uma aplicação controlada em um evento de alto risco ambiental.

Alvarenga et al. (2021) comenta que o aumento da altura de 0,5 m para 0,9 m pode elevar o potencial de deriva em mais de 200%, além de degradar o CV, pois o padrão de distribuição da ponta perde sua forma original antes de atingir o alvo, gerando zonas de subdose que comprometem a eficácia biológica. Contudo, na prática de campo, a altura de 0,9 m surge ocasionalmente como uma "oportunidade" de necessidade em terrenos com topografia altamente irregular ou em culturas de porte elevado com oscilações bruscas no relevo, visando evitar o impacto mecânico da barra no solo ou na cultura. Nestes casos excepcionais, para mitigar os danos à qualidade, a literatura recomenda obrigatoriamente a alteração da tecnologia de pontas para modelos de indução de ar, que produzem gotas grossas capazes de suportar a maior trajetória aérea sem sucumbir à deriva (Zhu et al., 2022).

4.5 INTERFERÊNCIA DO AMBIENTE NA APLICAÇÃO

A ambiência de precisão constitui o cenário dinâmico onde a física da gota encontra a fisiologia da planta, sendo o conjunto de variáveis meteorológicas o fator de maior incerteza e interferência na eficácia da tecnologia de aplicação. A importância de monitorar rigorosamente a umidade relativa do ar e a temperatura reside no fato de que esses parâmetros regem o Déficit de Pressão de Vapor (DPV), que é a força motriz da evaporação.

Conforme salientado por Minozzo et al. (2022), uma gota fina pode perder até 50% de seu volume em frações de segundo nessas condições, resultando em uma partícula tão leve que não possui energia cinética suficiente para romper a camada de ar estagnado sobre a folha, ficando suspensa e vulnerável à deriva ou simplesmente cristalizando o ingrediente ativo antes da absorção foliar. Portanto, as umidades consideradas adequadas para a segurança operacional situam-se acima de 60%, faixa onde a vida útil da gota é prolongada, permitindo que os adjuvantes e o princípio ativo atuem de forma plena na cutícula da planta. A deriva, definida como o movimento do produto para fora do alvo pretendido, é o principal risco ambiental da atividade. Conforme Maciel et al. (2018), ventos superiores a 10 km/h ou condições de inversão térmica podem redirecionar gotas pequenas ($< 100 \mu\text{m}$), causando fitotoxicidade em culturas. O uso de pontas com tecnologia de indução de ar, que produzem gotas grossas com bolhas de ar internas, tem se mostrado uma estratégia eficaz para reduzir a deriva sem comprometer severamente a cobertura foliar (ZHU et al., 2022).

O comportamento cinético de uma gota de pulverização, após romper a lâmina líquida na

saída do elemento gerador, é governado pela interação direta entre a força gravitacional e a força de arrasto aerodinâmico exercida pelo ar ambiente. Segundo Alvarenga (2018), no instante de sua formação, a gota possui uma velocidade inicial elevada, impulsionada pela pressão hidráulica do circuito. No entanto, o arrasto do ar atua imediatamente como uma força oposta ao movimento, desacelerando a gota até que ela atinja a sua velocidade terminal de queda ponto em que a força de arrasto se iguala ao peso da gota.

A física desse deslocamento e a transição dos regimes de escoamento ao redor da partícula são descritas pelo Número de Reynolds (Re), que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas do ar:

$$Re = \frac{\rho_{ar} \cdot v \cdot d}{\mu_{ar}} \quad (1)$$

Onde:

- ρ_{ar} é a densidade do ar;
- v é a velocidade relativa da gota em relação ao ar;
- d é o diâmetro da gota;
- μ_{ar} é a viscosidade dinâmica do ar.

Oliveira et al. (2020) explicam que gotas de maior diâmetro possuem maior massa e energia cinética, operando sob regimes de Reynolds mais elevados. Isso significa que elas conseguem vencer a resistência aerodinâmica do ar por mais tempo, mantendo uma trajetória vertical descendente retilínea e previsível.

Em contrapartida, gotas de diâmetro reduzido possuem massa desprezível. Elas atingem a sua velocidade terminal quase instantaneamente (frequentemente a poucos centímetros de distância do ponto de atomização) e passam a flutuar na corrente de ar. Sob essa condição, a trajetória deixa de ser governada pela gravidade e passa a ser controlada pelas correntes de vento horizontais e turbulências locais, configurando o início do processo de deriva física (Ramos et al., 2015).

4.6 O processo de evaporação e a redução dinâmica de diâmetro

Enquanto a gota se desloca em direção ao alvo, ela sofre uma transferência contínua de massa e calor para a atmosfera através do processo de evaporação. Esse fenômeno termodinâmico é altamente influenciado pelas condições psicrométricas do ambiente, sendo

quantificado pelo Déficit de Pressão de Vapor (DPV), que representa a demanda evaporativa do ar calculada a partir da temperatura e da umidade relativa (Gandolfo et al., 2013).

A perda de massa por evaporação reduz o diâmetro da gota de forma exponencial ao longo do tempo. Conforme demonstrado pela lei clássica do quadrado do diâmetro (d^2), a taxa de variação da superfície de uma gota pura em evaporação mantém-se constante para um determinado cenário microclimático:

(2)

$$\frac{d(d^2)}{dt} = -\lambda$$

Onde:

- d é o diâmetro da gota no tempo t
- λ é a constante da taxa de evaporação do fluido.

Christovam et al. (2016) alertam para a gravidade dessa redução dinâmica durante o tempo de queda no campo. À medida que a gota evapora e perde diâmetro, ela perde massa a uma razão cúbica, uma vez que a massa é proporcional ao volume da partícula.

Esse decréscimo acelerado de massa altera radicalmente o equilíbrio de forças aerodinâmicas. Uma gota classificada originalmente em uma categoria de tamanho seguro (como gotas médias), ao atravessar uma camada de ar quente e seca, pode atingir o dossel da cultura com seu diâmetro reduzido à metade, transicionando involuntariamente para a categoria de gota fina ou muito fina antes mesmo de interceptar o alvo pretendido (Oliveira et al., 2020).

Para contornar essa janela de perda, a engenharia de aplicação recorre ao uso de pontas com indução de ar ou à adição de adjuvantes que alteram as propriedades físico-químicas da calda. Os adjuvantes antideriva e antievaporantes atuam reduzindo a pressão de vapor do líquido ou aumentando a retenção de água, retardando a taxa de evaporação (λ) e permitindo que mesmo as frações intermediárias de gotas completem sua trajetória sem sofrer reduções críticas de diâmetro (Cunha et al., 2021).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 LOCAL E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Aplicação pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP, Campus de Dracena-SP. O estudo foi implementado em esquema fatorial triplo $2 \times 8 \times 2$, com duas alturas de aplicação (0,50 e 0,90 m), oito pontas de pulverização (Tabela 1) e duas condições de umidade relativa do ar (<30% e >70%), com quatro repetições.

Tabela 1 – Pontas de pulverização estudadas e suas características.

Tipo de Bocal	Modelo	Pressão (kPa)	Ângulo de Abertura	DMV ¹
Jato plano de indução de ar	MUG 015	207	110°	UG
	ADIA 015		110°	
Jato plano	AD 015	207	110°	F
	ADGA 015		120°	
	BD 015		110°	
Jato cônico vazio de indução de ar	MUGCV 90015	207	90°	UG
Jato cônico cheio	CH 100015	207	100°	G
Jato plano inclinado	ST 135015	207	135°	G

Fonte: Próprio autor.

Nota:DMV (diâmetro mediano volumétrico) - tamanho da gota informado pelo fabricante (MAGNOJET, 2024). UG - Ultra grossa. F - Fina. G – Grossas.

Foram selecionadas oito diferentes pontas hidráulicas de pulverização: duas de jato plano com indução de ar (MUG 015 e ADIA 015), três de jato plano padrão (AD 015, ADGA 015 e BD 015), duas pontas de jato cônico, sendo uma cônica vazia (MUGCV 90015) e outra cheia (CH 100015) e, por fim, uma ponta de jato plano inclinado a 30° posicionado no sentido de deslocamento de aplicação (ST135015). Ambas as pontas apresentam a mesma vazão de 0.15 galões por minuto sendo assim conforme a pressão de 40 Psi a categoria de vazão 568 l/min, conforme a norma ISO 10625:2018. As pulverizações foram realizadas na sala de pulverização, que possui um pulverizador estacionário com barra equipada com bicos de pulverização, espaçados a 50 cm e deslocando-se a uma velocidade constante de 5 km h⁻¹ (Figura 1).

Os testes ocorreram com volume de aplicação de 120 L/ha⁻¹ em todas as pontas e pressão de 207 kPa, utilizando água com tensão superficial de 70,85 mN/m como veículo. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram monitorados no momento das pulverizações por

meio de um termo-higrômetro e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Médias das condições meteorológicas no momento das pulverizações dos experimentos de deposição.

Dados Meteorológicos	Umidade Baixa	Umidade Alta
Temperatura inicial ¹ 16/08/2024	30.4 °C	28.4 °C
Temperatura final ¹ 16/08/2024	30.3 °C	27.5 °C
Umidade do ar inicial ¹ 17/01/2025	27%	70%
Umidade do ar final ¹ 17/01/2025	29%	74%
Temperatura inicial ² 19/09/2025	31.1 °C	22.3 °C
Temperatura final ² 19/09/2025	30.3 °C	22.8 °C
Umidade do ar inicial ² 16/01/2026	29%	70%
Umidade do ar final ² 16/01/2026	30%	69%

Fonte: Próprio autor.

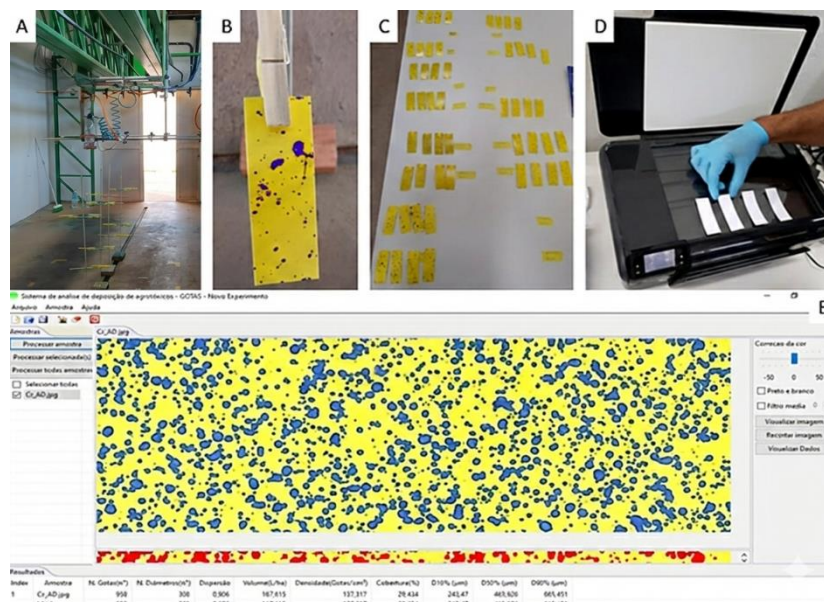
Nota:¹ primeiro teste de aplicação; ² segundo teste de aplicação.

5.2 IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS E COLETAS PARA ANÁLISES DOS FATORES

5.2.1 Coleta das amostras

Foram instaladas na sala de pulverização quatro hastes de ferro de 1,0 m, fixadas em madeira e espaçadas linearmente a 30 cm entre si. Assim, também, em sentido perpendicular à barra de pulverização, foram fixadas duas hastes menores, nas quais os papéis sensíveis à água (PSA) eram presos por prendedores nas extremidades. (Figura 2a). Nos PSA, utilizaram-se hastes com prendedores na base, anexadas conforme a altura do bico de pulverização: 0,5 m e 0,9 m. As alturas de 0,5 m e 0,9 m foram selecionadas com base em recomendações técnicas e em estudos de pulverização agrícola. A altura de 0,5 m representa a condição convencional de aplicação, recomendada para pontas de jato plano com ângulo de 110° e espaçamento de 50 cm entre os bicos, proporcionando sobreposição adequada dos jatos e uniformidade de distribuição (SENAR, 2021; IRRI, 2012). Já a altura de 0,9 m foi utilizada como condição extrapolada,

Figura 2 – Pulverização nos cartões (A), distribuição dos cartões para as pontas no simulador de aplicação a 50 cm e 90 cm (B), Suporte utilizado (C), Disposição das repetições na mesa (D), Digitalização no Scanner das repetições (E) e Leitura no programa Gotas.



Fonte: Próprio autor.

5.2.2 Determinação do diâmetro volumétrico das gotas

A determinação do diâmetro mediano volumétrico de gotas foi através do sistema de análise de imagens com feixe de luz emitido na pulverização de cada ponta lendo assim as diferentes gotículas entre 21 µm e 1732 µm de diâmetro VisiSize P15 (Figura 3A) realizada na empresa MagnoJet em Ibaiti-PR. As gotas foram medidas na altura de 0,50 m abaixo do orifício da ponta de pulverização, repetidas três vezes por 60 segundos. Em seguida, o diâmetro das gotas foi avaliado e expresso como DV0.1, DV0.5 e DV0.9, que têm por finalidade expressar o diâmetro de gotas para 10, 50 e 90% do volume total do líquido, sendo ele água, respectivamente. A amplitude relativa (AR) de gotas foi então calculada como: $(DV_{0,9} - DV_{0,1}) / DV_{0,5}$, e quantifica a uniformidade do tamanho das gotas em uma pulverização. Esta avaliação ocorreu de acordo com as normas ISO 25358:2018 (Internacional Standard, 2018). A fabricante das pontas baseia sua classificação do espectro de gotas na norma internacional ASABE S572.1 (da Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas e Biológicos). Essa metodologia utiliza o DMV (Diâmetro Mediano Volumétrico) e um conjunto de pontas de referência para categorizar o tamanho e a uniformidade das gotas geradas.

Figura 3 – Leitura do diâmetro volumétrico das gotas (A) e pulverização nas canaletas para perfil de distribuição volumétrica (B) (Silva, 2025).



Fonte: Próprio autor.

5.2.3 Análise da distribuição volumétrica e espectro de gotas.

O estudo de análise de distribuição volumétrica foi realizado pela empresa MagnoJet, em Ibaiti-PR, e obedeceu à norma ISO 5.682-1:2017. Três pontas do mesmo modelo foram instalados isoladamente com distância de 0,5 m na barra de pulverização, na posição vertical e nas alturas de 0,50 e 0,90 m em relação à superfície da mesa contendo canaletas de coleta compondo um esquema fatorial de 2×8 sendo duas alturas e oito pontas de pulverização) (Figura 3B). As pontas foram posicionadas uma em cada canaleta dos números 30, 40 e 50. O sistema hidráulico foi posto em funcionamento até que o fluxo de líquido (água) se estabilizasse, e a coleta foi iniciada até que as provetas das canaletas centrais (canaletas que recebem maior volume de água) atingissem 90% do seu limite máximo de volume.

O perfil de distribuição volumétrica foi então determinado com base na média dos volumes coletados em 80 canaletas, por 60 segundos, com três repetições para cada tratamento (ponta de pulverização). A uniformidade de distribuição volumétrica ao longo da faixa aplicada foi avaliada pelo coeficiente de variação (CV, %) (Bauer e Raetano, 2004; Ferreira et al., 2011). CVs de até 15% são considerados aceitáveis em pulverização agrícola (Hanif et al., 2023), contudo, CVs inferiores a 15% aplicam uma cobertura mais consistente e evitam falhas na aplicação (Slocombe, Sharda, 2015; Chethan et al., 2019; Shirwal et al., 2020).

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados de porcentagem de cobertura e densidade de gotas determinados no PSA, DV0,5, amplitude relativa e o coeficiente de variação da uniformidade de distribuição foram submetidos à análise de distribuição dos resíduos dos dados, à análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), através do software R, utilizando o pacote ExpDes.pt (Ferreira et al., 2025).

Foi realizado a duplicata dos experimentos de deposição em PSA, através de dois testes em umidade $< 30\%$ e dois testes em umidade $> 70\%$, realizado a comparação por análise conjunta de dados pelo software R, usando o pacote *EasyAnova*. A leitura informou $P < F$ (0,001); assim, os dados foram combinados e realizada a análise com 16 repetições por umidade, seguindo a anova e o teste de médias acima.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ESPECTRO DE GOTAS E DISTRIBUIÇÃO VOLUMÉTRICA DAS PONTAS

Os resultados do espectro de gotas estão representados pelo quadro médio da ANOVA (Tabela 3) e pelos testes de médias do diâmetro volumétrico (DV0,5) e da amplitude relativa (AR).

Tabela 3 – Quadrado médio da ANOVA (estatística F) e normalidade dos resíduos (probabilidade do teste de Shapiro-Wilk) para as variáveis DV0,5 e amplitude relativa (AR) do leitor VisiSize P15 em função das pontas de pulverização.

Fonte de Variação	gl	DV0,5	Signif.	AR	Signif.
		Quadrado Médio		Quadrado Médio	
Ponta (P)	7	491,170	*	0,056162	*
Resíduo	16	1		0,000150	
CV		0,14%		1,19%	
Shapiro-Wilk		0,484286		0,05145675	

Fonte: Próprio autor.

Nota: Signif.: * = significativo a 5% de probabilidade. ** = significativo a 1% de probabilidade.
gl: grau de liberdade. CV: coeficiente de variação.

Analisando o quadro médio da ANOVA, houve significância ao nível de 5% de probabilidade para o fator ponta, tanto para DV0,5 quanto para AR.

Tabela 4 – Comparação do teste de média para Diâmetro mediano e para a amplitude relativa (AR) realizados no equipamento VisiSize P15.

Ponta	Classe de Gotas	DV0,1 (μm)	DV0,5 (μm)	DV0,9 (μm)	AR
ADGA	Fina	108	131 e	292	1,41 c
CH100	Fina	86	144 h	260	1,2 b
BD	Fina	98	147 g	241	0,97 d
AD	Fina	107	170 f ¹	294	1,09 b
ST	Grossa	310	548 d	786	0,86 e
ADIA	Ultra grossa	384	804 c	1238	1,06 c
MUGCV	Ultra grossa	322	911 b	1432	1,21 a
MUG	Ultra grossa	629	1133 a	1572	0,83 f

Fonte: Próprio autor.

Nota: Pontas: AD - AD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°. ADGA - ADGA 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 120°. ADIA - ADIA 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°. BD - BD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°. CH100 - CH100015, jato cônico cheio, 207 kPa, ângulo de 100°. MUG - MUG 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°. MUGCV - MUGCV 900015, jato cônico vazio, 207 kPa, ângulo de 90°. ST - ST 015, jato plano inclinado, 207 kPa, ângulo de 135°. ¹: Médias seguidas por letras minúsculas comparam as pontas de pulverização em cada altura pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$). ²: Médias seguidas por letras maiúsculas comparam as alturas em cada ponta de pulverização pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$).

As pontas que apresentaram os maiores valores de diâmetro mediano volumétrico (DMV) foram MUG, MUGCV e ADIA, classificadas como gotas ultra grossas, além da ponta ST, classificada como gota grossa. As demais pontas avaliadas apresentaram valores de DMV enquadrados na classe de gotas finas.

A análise da relação entre DMV e a AR não evidenciou um padrão consistente de correlação entre esses parâmetros, não sendo observada tendência definida de aumento ou de redução simultânea entre ambos. Foram verificados valores de AR superiores a 1,20 tanto nas pontas que produziram gotas ultra grossas quanto nas finas, indicando que a uniformidade do espectro de gotas não esteve diretamente associada à classe de gotas.

Entretanto, a maior parte das pontas avaliadas apresentou valores de amplitude relativa entre 0,8 e 1,2. Esses resultados indicam um espectro de gotas relativamente homogêneo e compatível com a uniformidade normalmente esperada para pontas de pulverização em condições operacionais convencionais.

Tabela 5 – Quadrado médio da ANOVA (estatística F) e normalidade dos resíduos (probabilidade do teste de Shapiro-Wilk) para a variável coeficiente de variação (CV%) da uniformidade de distribuição em função da altura e da ponta de pulverização.

Fonte de Variação	<i>gl</i>	% Coeficiente variação Quadrado Médio	Signif.
Altura (A)	1	4	**
Ponta (P)	7	5	
A*P	7	3	**
Resíduo	32	2	
CV		0,6%	
Shapiro-Wilk		0,03449676	

Fonte: Próprio autor.

Nota: Signif.: * = significativo a 5% de probabilidade. ** = significativo a 1% de probabilidade.
gl: grau de liberdade. CV: coeficiente de variação.

O quadro médio da ANOVA (Tabela 3) indica interação significativa entre a altura de deposição da barra e a ponta de pulverização no coeficiente de uniformidade de distribuição volumétrica, ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 6 – Estatística coeficiente de uniformidade de variação.

Pontas	Classe de Gotas	Coeficiente de variação (CV%)	
		0,50 m	0,90 m
ADGA	Fina	12 a ¹ B ²	10 Ca
CH100	Fina	13 aB	11 bA
BD	Fina	14 aB	11 aA
AD	Fina	12 aB	10 bA
ST	Grossa	13 bB	8 dA
ADIA	Ultra grossa	8 bB	7 dA
MUGCV	Ultra grossa	41 cB	16 eA
MUG	Ultra grossa	12 cB	6 eA

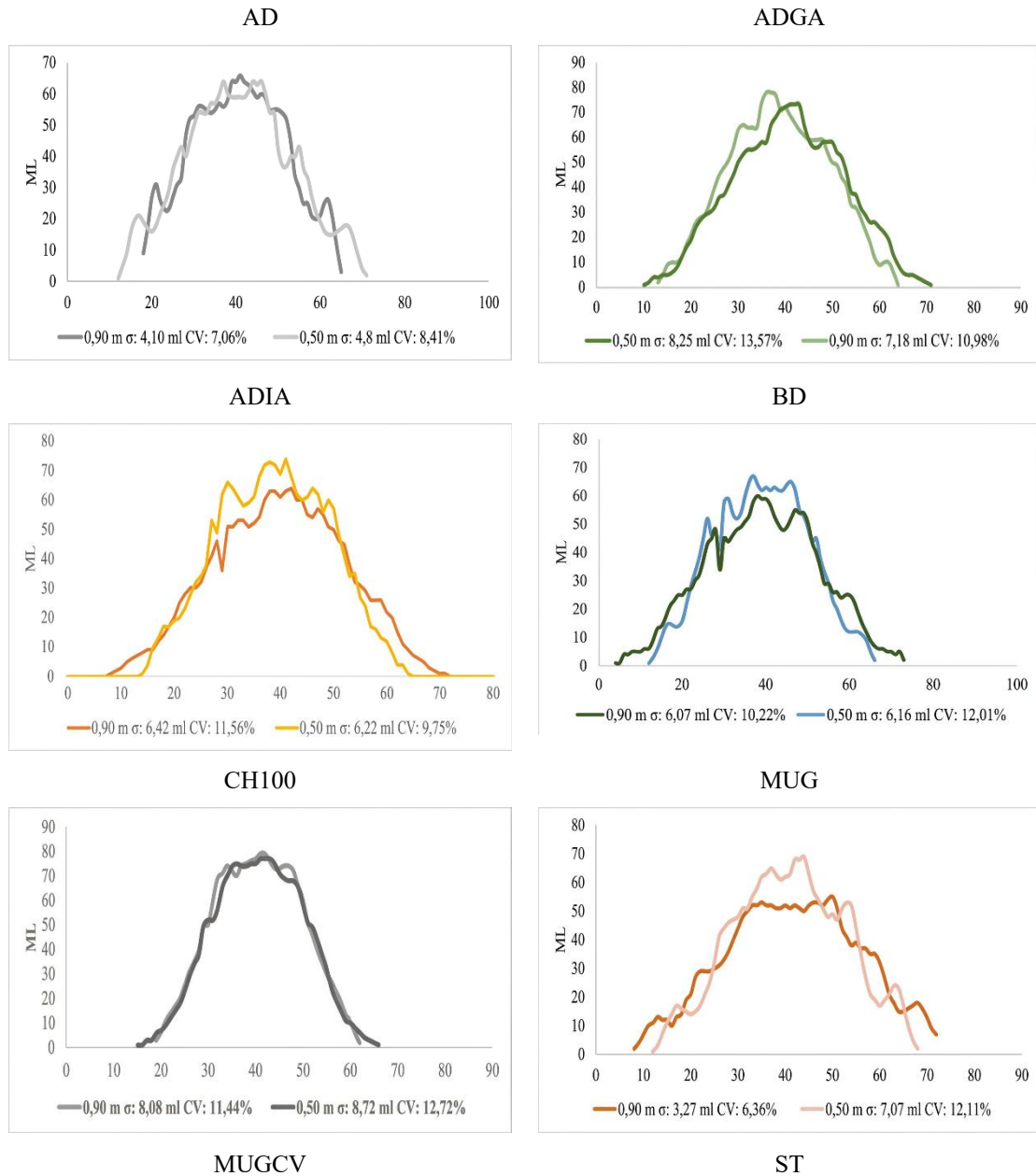
Fonte: Próprio autor.

Nota: Pontas: AD - AD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°. ADGA - ADGA 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 120°. ADIA - ADIA 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°. BD - BD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°. CH100 - CH 100015, jato cônico cheio, 207 kPa, ângulo de 100°. MUG - MUG 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°. MUGCV - MUGCV 900015, jato cônico vazio, 207 kPa, ângulo de 90°. ST - ST 015, jato plano inclinado, 207 kPa, ângulo de 135°. 1: Médias seguidas por letras minúsculas comparam as pontas de pulverização em cada altura pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$). 2: Médias seguidas por letras maiúsculas comparam as alturas em cada ponta de pulverização pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$).

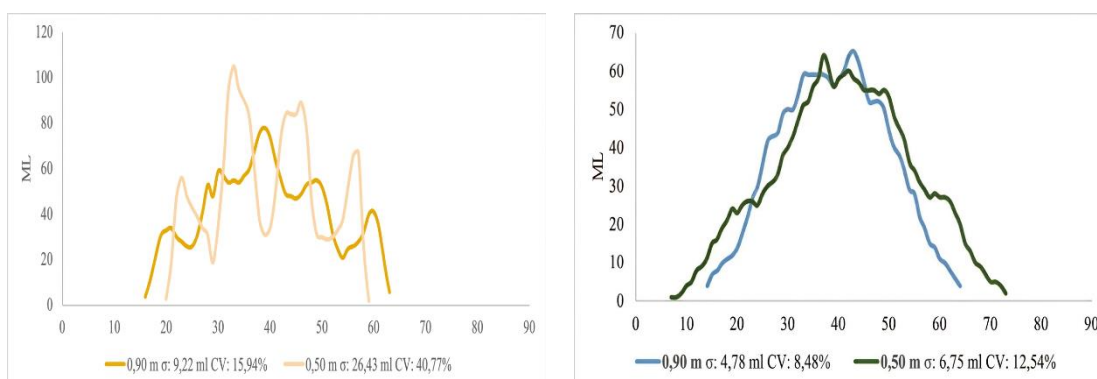
O perfil de distribuição volumétrica de pontas de pulverização operando nas alturas de 0,5 e 0,9 m pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Perfil de distribuição volumétrica nas alturas de 50 e 90 cm. Desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV%) dos volumes de água coletados em diferentes canaletas das pontas de pulverização estudadas

(continua)



(conclusão)



Fonte: Próprio autor.

Nota: Pontas: AD - AD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°, gota fina. ADGA - ADGA 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 120°, gota fina. ADIA - ADIA 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°, gota ultra grossa. BD - BD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°, gota fina. CH100 - CH 100015, jato cônico cheio, 207 kPa, ângulo de 100°, gota grossa. MUG - MUG 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°, gota ultra grossa. MUGCV - MUGCV 900015, jato cônico vazio, 207 kPa, ângulo 90°, gota ultra grossa. ST - ST 015, jato plano inclinado, 207 kPa, ângulo de 135°, gota grossa.

A partir do desdobramento dos fatores ponta de pulverização e altura de deposição, observa-se que as pontas ADIA e MUG (gotas grossas) apresentaram menores valores de coeficiente de variação (CV) em comparação às pontas que produzem gotas finas. A exceção foi a ponta MUGCV, que apresentou o maior CV entre os tratamentos avaliados. Esses resultados podem estar relacionados à pressão de trabalho empregada, uma vez que o aumento da pressão pode contribuir para a redução do coeficiente de variação e para a melhoria da uniformidade da distribuição.

O comportamento observado está intrinsecamente ligado às características construtivas da ponta avaliada e à dinâmica de sobreposição dos jatos. O modelo MUGCV, por se tratar de uma ponta que opera com indução de ar para gerar gotas na classe de "Ultra Grossas" e possuir uma geometria de deposição específica (jato plano direcionado ou cônico modificado para aplicação de herbicidas sistêmicos), exige critérios rigorosos de altura e espaçamento para consolidar o traspasse correto entre os bicos adjacentes, essa ponta foi lançada com o objetivo da aplicação de barra no sentido horizontal (Magnojet, 2026).

De modo geral, as pontas apresentaram menores valores de CV na altura de 0,90 m, o que pode ser atribuído à maior sobreposição dos jatos e, consequentemente, à maior uniformidade de distribuição. Entretanto, em condições reais de campo, o aumento da altura da barra pode intensificar a influência das condições meteorológicas, especialmente o vento, favorecendo a deriva e reduzindo a eficiência da aplicação. Dessa forma, a altura da barra de

pulverização deve ser considerada com cautela nas aplicações de defensivos.

Destaca-se que a ponta MUG apresentou redução de aproximadamente 50% no coeficiente de variação quando comparadas as alturas de deposição de 0,50 m e 0,90 m, evidenciando elevado potencial de uniformidade na distribuição. Esse comportamento indica que essa ponta pode ser considerada uma alternativa confiável entre as pontas produtoras de gotas ultra grossas, especialmente em situações que exigem maior segurança quanto à deriva. O CV das pontas produtoras de gotas finas apresentou menor variação entre as alturas de 0,50 m e 0,90 m quando comparadas às pontas produtoras de gotas grossas e ultra grossas. A maior diferença observada foi de aproximadamente 3% na ponta BD, enquanto as pontas produtoras de gotas ultra grossas apresentaram variações mais expressivas, como observado na ponta MUG. Esses resultados indicam que, na altura da barra de 0,50 m, as pontas produtoras de gotas finas podem representar uma alternativa viável, enquanto, na altura de 0,90 m, tendem a apresentar valores de CV mais elevados.

A uniformidade de distribuição pode ser influenciada por fatores operacionais, como a pressão de trabalho e o espaçamento entre as pontas da barra de pulverização. Conforme relatado por Cunha e Ruas (2006), a altura de aplicação recomendada situa-se entre 0,50 e 0,90 m, e ajustes adequados de pressão e de espaçamento entre pontas podem contribuir para reduzir o CV a valores próximos de 15%, considerados adequados para uma distribuição volumétrica satisfatória.

6.2 DEPOSIÇÃO NO PAPEL HIDROSSENSÍVEL COBERTURA E DENSIDADE DE GOTAS/CM²

Tabela 7 – Quadrado médio da ANOVA (estatística F) e normalidade dos resíduos (probabilidade do teste de Shapiro-Wilk) para as variáveis % de cobertura do PSA e densidade de gotas em função da altura de aplicação, da ponta de pulverização e da umidade do ar.

Fonte de Variação	gl	% Cobertura Quadrado Médio	Signif.	Densidade de gotas Quadrado Médio	Signif.
Altura (A)	1	335.8584	**	339.94413	**
Ponta (P)	7	285.46788	**	343.48008	**
Umidade (U)	1	337.54515	**	23.86541	**
A*U	7	4.7537		2.97009	*
A*P	1	6.86351		1.98254	
P*U	7	9.8536	*	3.35376	**
A*P*U	7	13.65443	*	3.17998	**
Resíduo	96	2.9973	**	1.05568	
CV		11,59%		13,72%	
Shapiro-Wilk		0,0438		0,0449	

Fonte: Próprio autor.

Nota: Signif.: * = significativo a 5% de probabilidade. ** = significativo a 1% de probabilidade.

gl: grau de liberdade. CV: coeficiente de variação.

A Tabela 5 apresenta o teste de médias da ANOVA para a densidade de gotas e a cobertura do papel hidrossensível, com os fatores altura de deposição e umidade relativa. A leitura indica que houve interação tripla ($P < 0,05$).

Tabela 8 – Densidade de gotas no papel hidrossensível e desvio padrão ($\pm$ dp) e diferentes pontas de pulverização, em diferentes umidades relativas do ar.

Ponta	Classe de Gotas	Altura m	Umidade alta $\geq 70\%$	Umidade baixa $\leq 30\%$
ADGA	Fina	0,50	187 ± 17 aCa	167 ± 10 aBa
ADGA	Fina	0,90	189 ± 23 aBa	115 ± 6 bCb
CH100	Fina	0,50	169 ± 3 aCa	139 ± 14 aCa
CH100	Fina	0,90	154 ± 21 aCa	133 ± 13 aCa
BD	Fina	0,50	283 ± 22 aAa	362 ± 14 aAa
BD	Fina	0,90	266 ± 15 aAa	235 ± 17 bAb
AD	Fina	0,50	255 ± 11 a ¹ B ² a ³	186 ± 13 aBb
AD	Fina	0,90	187 ± 16 bBa	170 ± 13 aBb
ST	Grossa	0,50	145 ± 8 aDa	101 ± 6 aDb
ST	Grossa	0,90	105 ± 7 bDa	76 ± 13 bDb
ADIA	Ultra grossa	0,50	52 ± 6 aEa	48 ± 8 aEa
ADIA	Ultra grossa	0,90	50 ± 10 aEa	37 ± 4 aEa
MUGCV	Ultra grossa	0,50	26 ± 4 aFa	19 ± 1 aFa
MUGCV	Ultra grossa	0,90	26 ± 6 aFa	23 ± 4 aEa
MUG	Ultra grossa	0,50	18 ± 4 aFa	16 ± 4 aFa
MUG	Ultra grossa	0,90	16 ± 5 aFa	13 ± 6 aEa

Fonte: Próprio autor.

Nota: Pontas: AD - AD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°. ADGA - ADGA 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 120°. ADIA - ADIA 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°. BD - BD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°. CH100 - CH 100015, jato cônico cheio, 207 kPa, ângulo de 100°. MUG - MUG 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°. MUGCV - MUGCV 900015, jato cônico vazio, 207 kPa, ângulo de 90°. ST - ST 015, jato plano inclinado, 207 kPa, ângulo de 135°. 1: Médias seguidas por letras minúsculas comparam as alturas de aplicação em cada ponta de pulverização para cada umidade do ar, pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$). 2: Médias seguidas por letras maiúsculas comparam as pontas de pulverização em cada altura de aplicação, para cada umidade do ar, pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$). 3: Médias seguidas por letras minúsculas em itálico comparam as umidades do ar em cada ponta de pulverização para cada altura de aplicação, pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$).

De acordo com a Tabela 8, a densidade de gotas apresentou um gradiente decrescente à

medida que aumentava a classe de diâmetro mediano volumétrico (DMV) das pontas de pulverização. Esse comportamento ocorre em função do maior volume individual das gotas classificadas como ultra grossas, que ocupam maior área de deposição e resultam em menor número de gotas por cm^2 . Em contrapartida, pontas que produzem gotas finas apresentam menor diâmetro, possibilitando um maior número de gotas por unidade de área e, consequentemente, maior densidade de deposição.

A análise conjunta dos fatores umidade relativa do ar e altura da barra evidenciou diferenças no desempenho das pontas quanto à densidade de gotas. As pontas AD e ST apresentaram resultados estatisticamente inferiores quando pulverizadas na umidade relativa do ar inferior a 30%, tanto na altura de 0,50 m quanto na de 0,90 m. Esses resultados indicam maior sensibilidade dessas pontas às condições ambientais desfavoráveis, especialmente à baixa umidade relativa do ar.

No geral, as pontas que produzem gotas finas apresentaram desempenho estatisticamente inferior na densidade de gotas quando pulverizadas na umidade relativa do ar de 30%, com exceção da ponta CH100. Por outro lado, as pontas que produzem gotas ultra grossas apresentaram comportamento semelhante nas condições de umidade relativa do ar de 70% e 30%, bem como nas alturas da barra de 0,50 e 0,90 m. Esses resultados indicam maior estabilidade operacional dessas pontas, caracterizando-as como alternativas adequadas para a aplicação de defensivos com menor suscetibilidade à deriva, como os herbicidas.

A ponta CH100 destacou-se entre as pontas produtoras de gotas finas, apresentando elevada densidade de gotas, mesmo em condições de baixa umidade relativa e na altura da barra de 0,90 m, atingindo valores de até $133 \text{ gotas cm}^{-2}$.

Resultados semelhantes foram observados por Reynaldo et al. (2020), que avaliaram diferentes pontas de pulverização no controle do mofo branco em feijoeiro, utilizando fungicidas sistêmicos, sob uma umidade relativa aproximada de 40% no momento da aplicação. Os autores verificaram que a ponta CH-100 apresentou um dos maiores níveis de controle da doença, além de proporcionar a segunda maior produtividade entre os tratamentos avaliados, evidenciando sua eficiência em condições de aplicação com menor umidade relativa do ar.

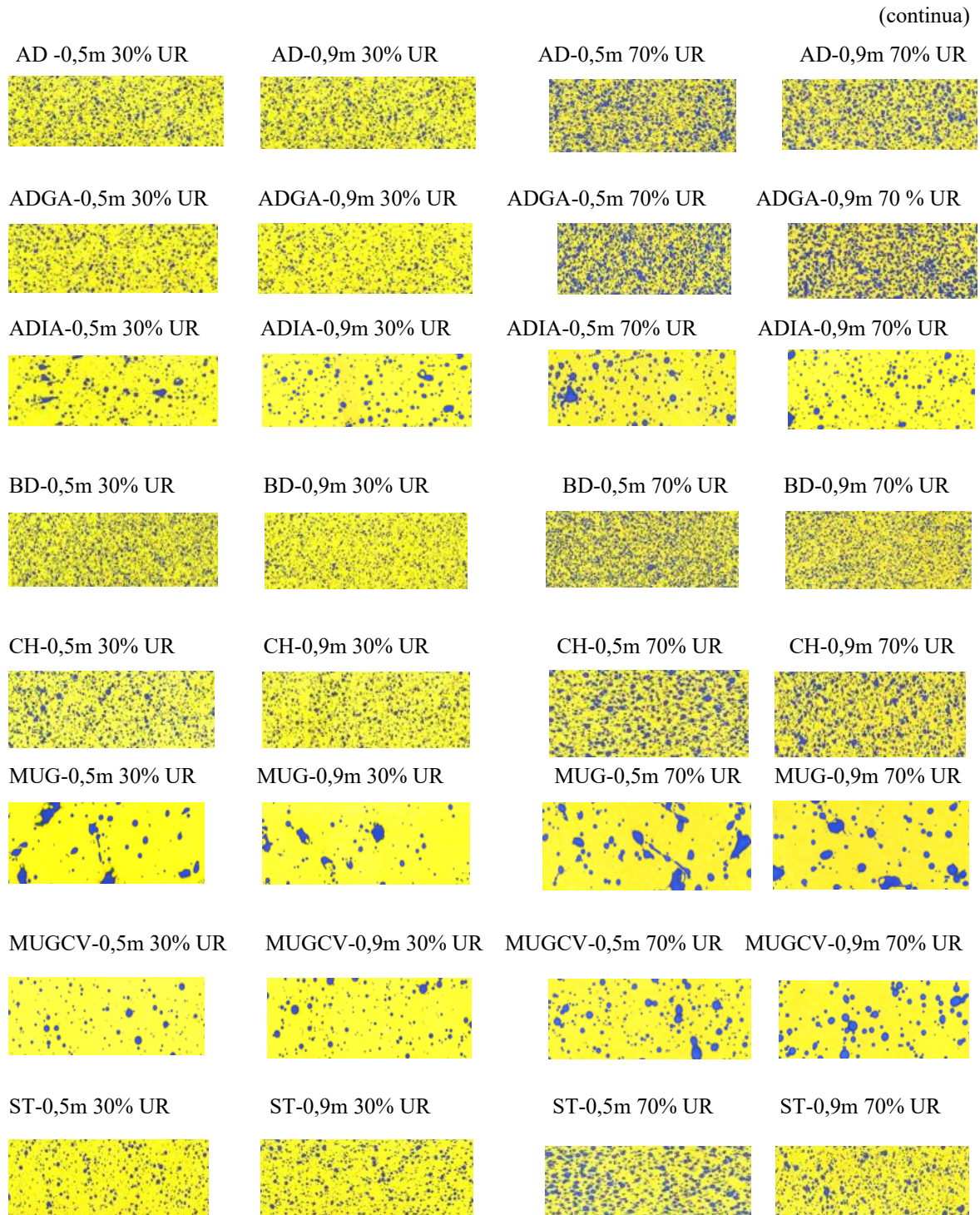
Tabela 9 – Porcentagem de cobertura em papel hidrossensível e desvio padrão com aplicação foliar de água para diferentes pontas de pulverização em duas umidades relativas do ar ($\leq 30\%$ e $\geq 70\%$).

Ponta	Classe de Gotas	Altura m	Umidade alta $\geq 70\%$	Umidade baixa $\leq 30\%$
ADGA	Fina	0,50	19 ± 6 aBa	16 ± 8 aBb
ADGA	Fina	0,90	17 ± 8 aBa	12 ± 2 bBb
CH100	Fina	0,50	21 ± 3 aAa	18 ± 7 aBa
CH100	Fina	0,90	18 ± 5 aBa	17 ± 5 bAa
BD	Fina	0,50	23 ± 9 aAa	25 ± 7 aAa
BD	Fina	0,90	21 ± 7 aAa	16 ± 6 bAb
AD	Fina	0,50	22 ± 6 aAa	19 ± 6 aBb
AD	Fina	0,90	17 ± 7 aBa	16 ± 9 bAb
ST	Grossa	0,50	18 ± 9 aBa	13 ± 2 aCb
ST	Grossa	0,90	13 ± 6 bCa	10 ± 9 bBb
ADIA	Ultra grossa	0,50	18 ± 4 aBa	12 ± 6 aCb
ADIA	Ultra grossa	0,90	13 ± 5 bCa	9 ± 3 bCb
MUGCV	Ultra grossa	0,50	15 ± 4 aCa	7 ± 5 aDa
MUGCV	Ultra grossa	0,90	10 ± 7 bDa	8 ± 3 bCa
MUG	Ultra grossa	0,50	12 ± 5 aDa	9 ± 6 aDb
MUG	Ultra grossa	0,90	8 ± 7 bDa	7 ± 7 bCb

Fonte: Próprio autor.

Nota: Pontas: AD - AD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°. ADGA - ADGA 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 120°. ADIA - ADIA 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°. BD - BD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°. CH100 - CH 100015, jato cônico cheio, 207 kPa, ângulo de 100°. MUG - MUG 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°. MUGCV - MUGCV 900015, jato cônico vazio, 207 kPa, ângulo de 90°. ST - ST 015, jato plano inclinado, 207 kPa, ângulo de 135°. 1: Médias seguidas por letras minúsculas comparam as alturas de aplicação em cada ponta de pulverização para cada umidade do ar, pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$). 2: Médias seguidas por letras maiúsculas comparam as pontas de pulverização em cada altura de aplicação, para cada umidade do ar, pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$). 3: Médias seguidas por letras minúsculas em itálico comparam as umidades do ar em cada ponta de pulverização para cada altura de aplicação, pelo teste de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Figura 5 – Imagens dos papeis hidrossensíveis alturas de 0,5 m e 0,9 m. a esquerda está representando a umidade baixa e a direita umidade alta.



Fonte: Próprio autor.

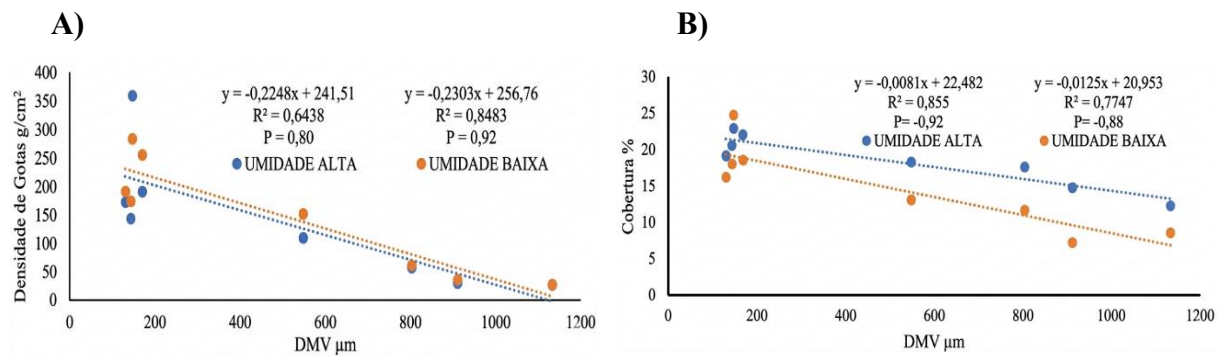
Nota: Pontas: AD - AD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°, gota fina. ADGA - ADGA 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 120°, gota fina. ADIA - ADIA 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°, gota ultra grossa. BD - BD 015, jato plano, 207 kPa, ângulo de 110°, gota fina. CH100 - CH 100015, jato cônico cheio, 207 kPa, ângulo

de 100°, gota grossa. MUG - MUG 015, indução de ar, 207 kPa, ângulo de 110°, gota ultra grossa. MUGCV - MUGCV 900015, jato cônico vazio, 207 kPa, ângulo 90°, gota ultra grossa. ST - ST 015, jato plano inclinado, 207 kPa, ângulo de 135°, gota grossa.

De acordo com as Tabelas 8 e 9, verifica-se um padrão consistente entre a porcentagem de cobertura e a densidade de gotas no PSA em função do diâmetro mediano volumétrico (DMV) das pontas de pulverização. Observa-se que a porcentagem de cobertura, assim como a densidade de gotas, diminuiu com o aumento do DMV, evidenciando a relação direta entre o tamanho das gotas e a quantidade de impactos por unidade de área. Pontas que produzem gotas finas proporcionaram maiores valores de cobertura e densidade de gotas, enquanto pontas produtoras de gotas grossas e ultra grossas apresentaram menores valores desses parâmetros. Entretanto, a altura da barra mostrou-se mais determinante para a cobertura dos PSA do que para a densidade de gotas. Verifica-se que, sob condição de umidade relativa do ar de 70%, apenas as pontas que produzem gotas finas apresentaram resultados estatisticamente semelhantes entre as alturas da barra avaliadas. Para as demais pontas, especialmente quando a pulverização foi realizada em baixa umidade relativa do ar ($< 30\%$), observou-se redução significativa na porcentagem de cobertura na altura de 0,90 m.

Resultados semelhantes foram observados por Ferreira (2023), que avaliou a deposição da ponta MUG a 0,80 m acima do alvo. O autor observou, em PSA, valores médios de cobertura próximos de 16,5%, o que constitui um dos maiores valores entre as pontas avaliadas, corroborando os resultados observados nesse estudo. A ponta MUG apresentou maior eficiência de controle em comparação às pontas que produziram gotas de menor diâmetro volumétrico, evidenciando a eficiência de pontas produtoras de gotas ultra grossas em aplicações de herbicidas.

Figura 6 – Correlação entre Densidade de Gotas (Figura 6A) Cobertura (Figura 7B) entre DMV.



Fonte: Próprio autor.

A análise de correlação evidenciou claramente o padrão de comportamento entre a porcentagem de cobertura e a densidade de gotas em função do diâmetro volumétrico mediano (DMV). O coeficiente de correlação de Pearson indicou forte correlação negativa entre o DMV e as variáveis cobertura e densidade de gotas, tanto na condição de umidade relativa de 70% quanto de 30%, confirmando a tendência de redução desses parâmetros com o aumento do tamanho das gotas.

Entretanto, a análise comparativa das retas de regressão obtidas para as duas condições de umidade relativa revelou comportamentos distintos entre as variáveis avaliadas. Para a variável cobertura, observa-se que as retas referentes às umidades relativas de 70% e 30% apresentam valores iniciais próximos, porém tornam-se progressivamente mais distantes à medida que o DMV aumenta. Por outro lado, quanto à densidade de gotas, as retas partem com maior distanciamento entre as condições de umidade, tornando-se mais próximas à medida que o DMV aumenta.

Esse comportamento pode ser explicado pelo processo de coalescência das gotas sobre a superfície do PSA antes da leitura. A coalescência promove a formação de manchas maiores, resultando em aumento aparente da porcentagem de cobertura e em redução do número de gotas contabilizadas por unidade de área. Esse efeito tende a ser mais evidente em gotas de maior diâmetro, o que contribui para as diferenças observadas entre as variáveis cobertura e densidade de gotas sob diferentes condições de umidade relativa do ar.

7 CONCLUSÕES

A umidade relativa do ar e a altura da barra de pulverização influenciaram a porcentagem de cobertura, a densidade de gotas e a uniformidade de distribuição das pontas, especialmente quando as pulverizações foram realizadas com umidade relativa do ar $\leq 30\%$ na altura da barra de 0,90 m. No geral, a altura da barra de 50 cm resultados superiores de uniformidade de distribuição referente aos obtidos a 0,90 m.

As pontas que produzem gotas ultra grossas quando pulverizadas em umidade relativa do ar $\leq 30\%$ apresentaram maior uniformidade de distribuição.

As pontas que produzem gotas finas são mais indicadas para situações que exigem maior cobertura e maior densidade de gotas por unidade de área, especialmente sob condições favoráveis de aplicação, como umidade relativa próxima de 70% e altura de aplicação de 0,50 m. Entretanto, em condições de umidade relativa $\leq 30\%$ e altura da barra de 0,90 m, observa-se redução significativa no desempenho dessas pontas

A porcentagem de cobertura e a densidade de gotas estão diretamente relacionadas ao DMV. De modo geral, com o aumento do DMV reduz a porcentagem de cobertura e a densidade de gotas.

REFERÊNCIAS

ALBERTA. Agriculture and Rural Development. **Air temperature, relative humidity and droplet size effects on pesticide drift**. Alberta: AARD, 2015. 12 p.

ALVARENGA, C. B. **Tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários: conceitos e dinâmica de gotas**. 1. ed. Uberlândia: Edição do Autor, 2018. 185 p.

ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; MARTINS, B. H.; SARTORI, M. S.; COSTA, N. V. Efeito das condições meteorológicas na pulverização de defensivos agrícolas. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 340-349, 2014.

ALVARENGA, C. B.; SARTORI, M. S.; GONÇALVES, V. A.; OLIVEIRA, M. V. M. Dinâmica de formação de gotas e espectro de pulverização sob condições de laboratório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 25, n. 8, p. 551-558, 2021.

ASABE – AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASABE S572.1: Spray nozzle classification by droplet spectra**. St. Joseph: ASABE, 2011. 4 p.

AZEEZ, M. H. Agricultural mechanization: a review on its impact on crop production and operational efficiency. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 16, n. 3, p. 102-110, 2021.

BAIO, F. H. R.; SILVA, E. E.; SANTOS, G. S. Uniformidade transversal de distribuição de pontas de pulverização de grande ângulo por deflexão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, n. 2, p. 214-222, 2019.

BAUER, F. C.; RAETANO, C. G. Distribuição volumétrica de calda de pulverização produzida por pontas de jato plano e de jato cônico vazio. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 1, p. 27-34, 2004.

BAUMHARDT, R. L.; MAREK, G. W.; GOWDA, P. H.; BRAUER, D. K. Progress and challenges in agricultural mechanization for crop production. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 5, p. 1823-1834, 2017.

CHAIM, A. **Manual do programa Gotas para avaliação da deposição de pulverização**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. 18 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 72).

CHETHAN, C. R.; SHARDA, R.; SLOCOMBE, J. W.; REZAEI, M. Transverse distribution uniformity of agricultural spray nozzles under laboratory conditions. **International Journal of Agricultural Engineering**, v. 12, n. 2, p. 145-152, 2019.

CHRISTOVAM, R. S.; CHECHETTO, R. G.; PRADO, E. P.; ANDRADE, M. S. Redução dinâmica do diâmetro de gotas de pulverização sob efeito do déficit de pressão de vapor. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 37, n. 4, p. 1895-1904, 2016.

- CUNHA, J. P. A. R. da; RUAS, R. A. A. Uniformidade de distribuição volumétrica de pontas de pulverização de jato plano duplo de indução de ar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 2, p. 115-121, 2006.
- CUNHA, J. P. A. R. da; SILVA, O. E. Inconsistências operacionais no uso de pontas de padrão cônico em barras de pulverização horizontais. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 52, e71420, p. 1-9, 2022.
- CUNHA, J. P. A. R. da; ALVES, G. S.; MARQUES, R. S. Espectro de gotas e penetração de calda em dossel de soja utilizando pontas de jato plano e cônico. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 50, n. 3, p. 375-383, 2019.
- CUNHA, J. P. A. R. da; SOUZA, F. J.; PERES, T. A. B. Adjuvantes antideriva eantievaporantes na mitigação das perdas ambientais em tecnologia de aplicação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 37, e37045, p. 1-12, 2021.
- ELWAKEEL, A. E.; REZAEI, M.; SHARDA, A. Impact of boom height and nozzle technology on spray deposition uniformity and drift potential. **Transactions of the ASABE**, v. 64, n. 4, p. 1125-1134, 2021.
- FERREIRA, M. C. Avaliação da eficiência biológica e parâmetros de cobertura superficial de bicos indutores de ar de fluxo estendido. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 10, n. 1, p. 14-23, 2023.
- FERREIRA, M. C.; ROMAN, R. A. A.; OLIVEIRA, D. A. Avaliação do coeficiente de variação na distribuição transversal de pontas de jato plano padrão e baixa deriva. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, n. 2, p. 264-273, 2020.
- FERREIRA, P. H.; RAETANO, C. G.; GANDOLFO, M. A. Distribuição volumétrica horizontal de pontas de pulverização hidráulicas em mesa de canaletas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 715-724, 2011.
- FERREIRA, D. F.; MATOS, M. S.; COSTA, V. A. **ExpDes.pt**: Pacote Experimental do R para análise de variância e testes de médias. Lavras: UFLA, 2025. R package version 1.3.
- GANDOLFO, M. A.; CHECHETTO, R. G.; CARVALHO, F. K.; GANDOLFO, U. D. Influência do efeito Venturi na formação de bolhas de ar encapsuladas e no diâmetro mediano volumétrico de pontas de indução de ar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 6, p. 1205-1214, 2013.
- GULER, H.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; DERKSEN, R. C. Spray characteristics and drift reduction potential with different windbreak structures and nozzle types. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1225-1233, 2012.
- HANIF, A.; SHARDA, A.; FLENNIKEN, J. Transverse spray distribution uniformity thresholds for modern drift-reducing nozzles. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 39, n. 1, p. 45-53, 2023.
- HE, X.; SONG, J.; ZHANG, J. Isolated environments for nozzle performance analysis: avoiding environmental masking in field testing. **Crop Protection**, v. 183, p. 106-114, 2025.

IRRI – INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Standard operating procedures for pesticide application and agricultural boom calibration**. Los Baños: IRRI, 2012. 34 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5682-1**: Equipment for crop protection — Spraying equipment — Part 1: Test methods for sprayer nozzles. Geneva: ISO, 2017. 18 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10625**: Equipment for crop protection — Sprayer nozzles — Colour coding for identification. Geneva: ISO, 2018. 12 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 25358**: Crop protection equipment — Droplet-size spectra from atomizers — Measurement and classification. Geneva: ISO, 2018. 15 p.

LAGUERRE, O.; HOANG, H. M.; FLICK, D. Experimental study and numerical simulation of droplet evaporation under controlled relative humidity and temperature. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 108, p. 1521-1532, 2017.

LASMAR, O.; CUNHA, J. P. A. R. da. Avaliação de pontas de pulverização hidráulicas na aplicação de fungicida em soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 22, n. 2, p. 41-47, 2006.

LASMAR, O.; CUNHA, J. P. A. R. da. Redução do potencial de deriva e evaporação de caldas fitossanitárias em função de pontas de pulverização e adjuvantes. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 24, n. 5, p. 389-398, 2016.

MACIEL, C. F. S.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C.; MISSE, J. S. Influência da altura da barra de pulverização e da pressão de trabalho na deriva de defensivos agrícolas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 49, n. 3, p. 410-418, 2018.

MAGNOJET. **Catálogo técnico de pontas de pulverização agrícola**. Ibaiti: MagnoJet, 2026. 52 p.

MATHEUS, R. W. **Comportamento de gotas de pulverização sob diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar**. 1999. 92 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

MATTHEWS, G. A.; BATEMAN, R.; MILLER, P. **Pesticide Application Methods**. 4. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2014. 526 p.

MINOZZO, M.; GANDOLFO, M. A.; ALMEIDA, D. P. Gestão de espectro de gotas utilizando sensores de difração a laser sob condições de estresse psicrométrico. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 9, n. 2, p. 45-53, 2022.

OLIVEIRA, R. B. de; ANTUNIASSI, U. R.; GANDOLFO, M. A. Spray drift in agricultural applications under different wind speeds and nozzle styles. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 41, n. 3, p. 334-342, 2021.

OLIVEIRA, J. V.; MOURA, A. R.; REIS, E. F. Comportamento cinético e transição de regimes de escoamento de gotas de pulverização em função do número de Reynolds. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 41, n. 5, p. 1651-1662, 2020.

OZEKI, Y.; CUNHA, J. P. A. R. da. Uso de análise digital de imagens de papéis hidrossensíveis para validação de tecnologia de aplicação no terço inferior da soja. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 64, n. 1, p. 89-97, 2021.

PRADO, E. P.; SILVA, T. R.; REIS, E. F. Desafios meteorológicos na tecnologia de aplicação de agroquímicos: o estresse ambiental mascarando a tecnologia. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 45, n. 2, p. 501-516, 2024.

PURDUE UNIVERSITY. **Extension Service**: Boom height calibration and drift management parameters for modern agricultural applicators. West Lafayette: Purdue University, 2024. 8 p.

RAETANO, C. G; CHECHETTO, R.G. Adjuvantes e formulações. In: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (org.). **Tecnologia de aplicação para culturas anuais**. 2. ed. rev. ampl. Passo Fundo: Aldeia Norte; Botucatu: FEPAF, 2019. cap. 1, p. 29-40.

RAMOS, H. H.; TAVARES, J. M.; REZENDE, D. T. Engenharia de pontas antideriva: efeito de pré-orifícios e rampas de deflexão sobre o espessamento de lâminas líquidas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 10, p. 912-921, 2015.

REYNALDO, E. F.; COSTA, N. V.; SOUZA, J. I.; GANDOLFO, M. A. Tecnologia de aplicação de fungicidas no controle de *Sclerotinia sclerotiorum* na cultura do feijoeiro sob condições meteorológicas restritivas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 4, p. 485-493, 2020.

SENAR – SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas**: regulação e calibração de pulverizadores de barra. Brasília: SENAR, 2021. 84 p. (Coleção SENAR, 208).

SHIRWAL, S.; SHARDA, R.; SLOCOMBE, J. W. Analysis of spray pattern uniformity and drift hazards under different boom operational parameters. **Journal of Agricultural Mechanization**, v. 51, n. 3, p. 204-211, 2020.

SIJS, R.; BONN, D. Evaporation and thermal degradation of pesticide droplets during flight. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 4521-4529, 2020.

SILVA, A. R. **Ensaio de distribuição transversal volumétrica e análise do espectro de gotas via VisiSize**. Ibaiti: Setor de Pesquisa & Desenvolvimento MagnoJet, 2025. 14 f. Relatório Técnico Interno.

SLOCOMBE, J. W.; SHARDA, A. Nozzle selection and horizontal spray pattern distribution uniformity. **Kansas State University Extension Publication**, Manhattan, v. 14, n. 2, p. 1-6, 2015.

SOUZA, F. J.; CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, G. S. Technology of phytosanitary application in periods of climatic stress. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 4, n. 3, p. 55-62, 2017.

WANG, X.; LI, Y.; TANG, Y. Physico-chemical property alterations of agrochemical spray mixtures under critical environmental conditions. **Pest Management Science**, v. 78, n. 6, p. 2214-2225, 2022.

WOLF, R. E.; DAGGUPATI, N. P. Nozzle type and operating pressure effects on spray droplet characteristics. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 21, n. 5, p. 793-801, 2005.

YU, Y.; DING, X.; ZHU, H. Evaporation rate of spray droplets on botanical surfaces as affected by relative humidity and temperature. **Biosystems Engineering**, v. 104, n. 3, p. 321-329, 2009.

ZAMPIROLI, R.; GANDOLFO, M. A.; PALLADINI, L. A. Avanços eletromecânicos e eletrônicos nas máquinas de aplicação fitossanitária moderna. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 42, n. esp, p. 115-124, 2022.

ZHANG, B.; TANG, Q.; CHEN, L. Hydraulic and electronic systems in precision pesticide applications: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 185, p. 106-118, 2021.

ZHU, H.; DERKSEN, R. C.; OZKAN, H. E. Evaluation of air-induction nozzles for reducing drift in critical operational heights. **Transactions of the ASABE**, v. 65, n. 1, p. 89-98, 2022.